



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

ESTUDIO Y MODELACIÓN 2D DEL ALUVIÓN DE MARZO DE 2015 EN CHAÑARAL, ATACAMA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

FABIOLA MACARENA GONZÁLEZ DÍAZ

PROFESOR GUÍA:

GABRIEL VARGAS EASTON

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

ANGELO CASTRUCCIO ÁLVAREZ

YARKO NIÑO CAMPOS

SANTIAGO DE CHILE

2018

**RESUMEN DE LA
MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA
POR: Fabiola Macarena González Díaz
FECHA: 18 de enero de 2018
PROFESOR GUÍA: Gabriel Vargas E.**

**ESTUDIO Y MODELACIÓN 2D DEL ALUVIÓN DE MARZO DE 2015 EN CHAÑARAL,
ATACAMA**

Este trabajo se enfocó en estudiar los factores geológicos, geomorfológicos y antrópicos que fueron relevantes en la génesis e impacto del flujo aluvial ocurrido el 25 de marzo de 2015 en el río Salado, durante la fase de inicio de un episodio El Niño en el Océano Pacífico, con el fin de comprender sus parámetros físicos y modelar su comportamiento en Chañaral.

En la ciudad de Chañaral, la inundación del aluvión abarcó un área total de 2,75 km² alcanzando un máximo de 4,2 m en altura, mientras que sus depósitos alcanzaron un máximo de 3,2 m. El estudio tanto en terreno como en laboratorio a partir de muestras de estos depósitos, permitió definir distintas facies según su granulometría, composición junto a otras características sedimentológicas, y su ubicación, encontrándose facies de canal, facies de desborde norte, facies de desborde proximal sur, facies de desborde distal sur, facies de desborde lateral sursur. A partir de lo anterior, se interpretó que el flujo aluvial que impactó la ciudad constituyó un flujo de barro en el cual el aporte de agua fue principalmente dado por la lluvia en la pre-cordillera y la alta cordillera de Los Andes en la cuenca hídrica del río Salado, y que el aporte de material habría provenido principalmente de la erosión de los depósitos no consolidados. El patrón de drenaje y la morfología de esta cuenca fueron factores que intensificaron los flujos puesto que todas las quebradas afluentes desembocan finalmente en un solo cauce principal, el río Salado en Chañaral, a lo cual se sumaron las altas pendientes en la pre-cordillera que imprimieron mayor energía a estos mismos flujos desde sus inicios afectando fuertemente también a las localidades ribereñas a lo largo de todo el cauce de este mismo río. Las superficies aterrazadas sobre las cuales se sitúa la ciudad de Chañaral actuaron como límites naturales de la inundación en la zona sur, en particular el límite entre la terraza baja y aquella inmediatamente superior, mientras que factores antrópicos como la carretera 5 norte y desagües subdimensionados para el paso de aluviones de gran magnitud, pudieron haber actuado como un factor que favoreció la inundación hacia el casco histórico de la ciudad y en el sector norte de la playa de Chañaral. Además, se constató un retroceso de la línea de costa, a raíz de la erosión provocada por el flujo aluvial, generando extensos socavones que en parte alcanzaron la posición de la línea de costa antes del vertimiento de sendos depósitos de relave, principalmente entre 1938 y 1975, favoreciendo el transporte de material eólico hacia la ciudad.

El flujo alcanzó un máximo de 2700 km³/s y un volumen estimado según el caudal en el tiempo de 0,1 km³ (ajustado por un margen de error a 0,07 km³), el cual sería clasificado como un evento extremadamente grande según la literatura. Este volumen, en conjunto con un Modelo de Elevación Digital (DEM) de 30 m de resolución, se usaron para generar una modelación con LAHARZ, concluyéndose la este relevancia de disponer de tanto las dimensiones y como la geometría de la inundación del aluvión para generar modelos 2D cercanos a la observación real, especialmente cuando existe pérdida de volumen en el mar. El conocimiento generado aquí busca ser un aporte para la planificación urbana,

tomando en cuenta el contexto geomorfológico así como para el diseño de obras de mitigación adecuadas a la magnitud geológica de los eventos aluviales como éste.

Agradecimientos

Este ha sido un largo proceso el cual ha estado lleno de altos y bajos, de penas y alegrías, de aciertos y desaciertos, una serie de eventos afortunados y desafortunados que se transformaron en una verdadera montaña rusa, los cuales jamás hubiese podido superar y enfrentar si no fuese por el apoyo de mi familia. Mamá, Papá, Dani y Marilú sé que nunca lo digo, pero los amo mucho y este logro jamás hubiese sido posible sin ustedes a mi lado. También a mis tíos, tías, abuelitas, primos, primas y en especial mi prima Romy. A toda mi familia, sé que siempre creyeron en mí hasta cuando ni siquiera yo lo hacía y por eso siempre estaré agradecida.

Quiero hacer una mención especial a mi Profesor Gabriel Vargas del cual no tan solo aprendí sobre geología, sino que también aprendí lo importante que es escuchar a la gente, lo importante que es observar desde un punto de vista naturalista y lo importante que es estudiar el cuaternario para así usar la geología para ayudar a nuestra sociedad con la prevención y la educación de los peligros geológicos. Gracias por darme la oportunidad de ser parte de este proyecto, por tenerme paciencia y por siempre preocuparse por mí. Agradecer también a los miembros de mi comisión por sus valiosos comentarios que enriquecieron la discusión.

Por supuesto agradecer al equipo de trabajo del aluvión por su energía y motivación; profesora Linda, Víctor, Pepe, Nicole, Carolina y Warrior. También a Cristian Cerda y mi familia de Diego de Almagro, Tía Edita y Abuelita Chela que nos recibieron con los brazos abiertos.

Compañeros de la universidad tuve muchos por estas idas y vueltas de la vida pero me gustaría agradecer a los que siento que siempre seguirán siendo parte de mi vida como Mauri, Chumi, Marta, Juan Jose, Gise, Dieguito, Nicoso, Rob, Jonytramamiltrampas, Anita, Gonzalito, Dragón, Flaco, , Chalo, JP, Pati, Loco Es, Juancho, Martin, Leo, Tutu, Isma, Caro Mirash, Guaton, Nico Rivas, Mauro E, Feña A, Fofito, Hernan B, Ciego, Vladis, Tuqui, Verito, Nico P, Capello, Choro Iván, Cano, Mosca, Chilote, Pauloka, Victor G, Tomy, Yayer, Nico L, Pancho Pa, Juanfi, Fabi, Francisco R, Juanito, Manu, Chino, Diego A, Mari, Vale F, Gaby, entre tantos otros que se me quedaron en el tintero. Muy agradecida de haber compartido esta experiencia universitaria con ustedes. Se vienen nuevas aventuras, eso lo aseguro.

El deporte fue muy importante por mi paso en la universidad ya que me enseñó por primera vez a ser parte de un equipo y del liderazgo positivo por lo que siempre estaré agradecida al equipo de basquetbol de la facultad y mis entrenadores Francia y el Julio. También a mi gran equipo de baby Weylas sin Rumbo Pentacampeonas de la Geochampion. Se viene la liga adultos.

Agradecer a Pablo Colla y Álvaro Rojas por las fotografías, a mis amigos de Diego de Almagro, Chañaral, Salado, Copiapó y Flamenco por facilitarme importante información la cual fue útil para el terreno y esta memoria. Agradecer al Manu por

ayudarme a ver la luz y encontrar el error. Gracias Joe por el apoyo final y siempre poner una sonrisa en mi rostro.

Gracias al programa de Hidrogeología del Departamento de Geología de la Universidad de Chile por el financiamiento de los gastos que implico la memoria y la participación al Congreso Geológico. Cabe agradecer al SERNAGEOMIN ya que su trabajo realizado en tiempo real para el aluvión fue de gran ayuda para la realización de esta tesis. También me gustaría agradecer a la Blanca por ser siempre un apoyo, a Don Carlos, Roberto, Rosita, Don Carlos, Kilo y todo el personal del departamento.

Finalmente, un especial agradecimiento a la gente de Chañaral, Salado, Diego de Almagro. Gracias por darme una enseñanza de vida. El ver su fuerza y entereza me enseñaron que siempre, contra viento y marea , nos podemos levantar.

Tabla de Contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Antecedentes Generales.....	1
1.2	Contexto histórico	2
1.3	Hipótesis	3
1.4	Objetivos	4
1.4.1	Objetivo General.....	4
1.4.2	Objetivo Específico	4
1.5	Marco Teórico de la zona de estudio	5
1.5.1	Marco geológico de la Hoya de El Salado	5
1.5.1.1	Paleozoico	5
1.5.1.2	Mesozoico	6
1.5.1.3	Cretácico	6
1.5.1.4	Cenozoico.....	7
1.5.1.4.1	Cuaternario	8
1.5.2	Geología estructural regional.....	8
1.5.3	Hidrografía y relieve de la hoya del río Salado	9
1.5.4	Marco climático.....	11
1.5.4.1	General.....	11
1.5.4.2	Caso de estudio.....	12
2	Metodología.....	14
2.1	Dems.....	14
2.1.1	Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global	14
2.1.2	GPS diferencial: toma de datos y procesamiento	14
2.2	Características del flujo de marzo del 2015 y sus depósitos.....	16
2.2.1	Niveles de Inundación y depósito	16
2.2.2	Depósitos: Muestreo, análisis granulométrico y análisis litológico.	18
2.2.3	Caudales y volúmenes.....	18
2.3	Modelación.....	19
2.3.1	Principios de Laharz	19
2.3.2	Calibración y Condiciones de borde para la modelación del aluvión de marzo de 2015.....	20
	Resultados: Caracterización del flujo de marzo de 2015, su impacto y sus depósitos.....	22

3.1 Alturas de inundación, altura de depósito y mapeo de flujo.....	22
3.1.1 Alturas de inundación y de depósito.....	22
3.1.2 Mapeo del flujo.....	26
3.1.2.1 Línea de Costa.....	30
3.2 Granulometría, textura y composición de los depósitos.....	32
3.2.1 Granulometría y sedimentología.....	32
Facies de canal (a).....	34
Facies de desborde norte (b).....	35
Facies de desborde proximal sur (c).....	36
Facies de desborde terminal sur (d).....	37
Facies de desborde lateral sur (e).....	38
Facies de terminal desborde sur (f).....	38
3.2.2 Clasificación del flujo.....	40
3.2.3 Litología.....	48
3.3 Estimación de Volúmenes.....	51
3.3.1 Caudal en el tiempo.....	51
3.3.2 Volúmenes con fórmulas empíricas.....	51
4 Modelación del flujo de marzo 2015.....	52
4.1 Hidrología de la Superficie.....	52
4.2 Punto de Partida.....	54
4.3 Resultados de la Modelación.....	55
5. Discusión.....	57
5.1 Comparación de la naturaleza del flujo a partir de los resultados de los depósitos y según la respuesta al caudal en el tiempo.....	57
5.2 Análisis modelación en Laharz.....	62
5.3 Volumen.....	63
5.4 Impacto en el cambio geomorfológico de la zona de estudio.....	64
6 Conclusiones.....	70
7 Bibliografía.....	72
8 Anexos.....	1
8.A Datos Depósito aluvión Chañaral.....	1
8.B Datos Inundación aluvión Chañaral.....	3
8.C Curvas Granulométricas Acumulativas.....	5
8.D Datos de muestras.....	1
8.E Regresiones lineales e integración Curva Caudal vs. tiempo.....	2

8.D Resumen Congreso Geológico Chileno 2015	3
8.E Poster Congreso Geológico Chileno 2015.....	3

Indice de Figuras

Figura 1: Compilación de fotografías que reflejan la intensidad y dimensiones del aluvión: Las imágenes superiores corresponden a la ciudad de Chañaral facilitadas por Pablo Collao y las inferiores son imágenes de la ciudad de Diego de Almagro, facilitadas por Álvaro Rojas.....	1
Figura 2: Mapa con rutas de acceso a la quebrada del Río Salado. Imagen modificada de la red caminera de Chile de MOP. Los puntos describen distintas estaciones meteorológicas (verde: Población Aeropuerto Chañaral, Rosa: Capitanía de Puerto Chañaral, Amarillo: Pampa Austral Sur, Celeste: Pampa Austral Norte, Morada: Inteltec, Blanca: Estación Cine Inca, Naranja: Cobresal, azul: La Ola, negro: Quebrada los arroyos).	2
Figura 3: (a) Fotografía de Chañaral después del maremoto de 1922 (b) Fotografía que muestra los destrozos e inundaciones causados por el aluvión del 1972 . Imágenes obtenidas en http://www.museodeatacama.cl/	3
Figura 4: Mapa geológico de la zona de estudio modificado del Mapa de Chile de escala 1:1000000 (SERNAGEOMIN, 2010)	5
Figura 5 : Imagen DEM STRM 30 modificada con la morfología de la cuenca, el talweg en azul del río Salado extraído con Rivertools y los lugares principales de la zona. En líneas punteadas se muestra límites aproximados de los rasgos morfológicos principales.	10
Figura 6: Morfología de la cuenca de Río Salado con su mapa de pendientes. ...	11
Figura 7: DEM generado a partir de STRM para la zona de estudio visto a una escala 1:500000.	14
Figura 8: Toma de datos en la ciudad de Chañaral.....	15
Figura 9: Zoom del DEM STRM de la ciudad de Chañaral, donde se observa en color azul los datos de Gps diferencial, el punto rojo de la estación base, la red de drenaje en azul y curvas de nivel en verde, acotadas a la zona de interpolación. ...	16
Figura 10: Imagen que muestra la metodología de cómo se tomaron los datos de altura de inundación y depósito.....	17
Figura 11: Imagen donde muestra el límite de la inundación en la ciudad de Chañaral. (Fotografía facilitada por Pablo Collao, 2015).....	17
Figura 12: Sección transversal (A) y planimétrica (B) definidas para un lahar, que se utilizan en el programa LAHARZ. (Modificado por Schilling de Iverson et al, 1998)	19
Figura 13 Gráficos Volumen versus Área, construidas utilizando los datos de lahares y de flujos no volcánicos. La estrella representa los datos del aluvión de Chañaral Marzo 2015 (Modificada de Iverson et al., 1998).....	20
Figura 14: Imagen satelital de Google Earth 2015 modificada mostrando en barras los 60 datos obtenidos en terreno. La parte roja representa los niveles de depósito, mientras que la parte azul la inundación. Las líneas punteadas representan la carretera ruta 5 norte. En tonos anaranjados se observa el área de inundación del aluvión. En el lado Oesteeste, en morado se demarca la línea de costa pre-aluvión. Las alturas han sido exageradas para ayudar a su interpretación.....	23
Figura 15: Chañaral en una imagen satelital de Google Earth año 2015 modificada. En tonos anaranjados se representa la zona de inundación del aluvión. Las líneas negras representan la ubicación de los perfiles de la Figura 16.....	24

Figura 16: Perfiles O-E de la inundación(azul), depósitos(rojo) y topografía(verde), mostrados en planta según su ubicación y a escala. La ubicación exacta de los perfiles se encuentra en la Figura 15.	25
Figura 17: Gráfico de altura versus distancia, que muestra el cambio de los niveles de inundación y alturas de depósitos desde el río Salado hacia el sur. Se representan las regresiones lineales correspondientes a cada uno.	26
Figura 18: Fotos que evidencian el efecto erosivo del paso del aluvión por el Río Salado. A la izquierda se observa en Diego de Almagro como cambió el ancho del cauce del río y a la derecha, en la ciudad de Salado, se observa cómo cambia la parte basal del cauce al evidenciarse el socavamiento bajo la línea del tren. (Fotografías facilitadas por Álvaro Rojas, 2015).	27
Figura 19: imagen satelital de Google Earth año 2015 modificada mostrando la confluencia entre el flujo de la quebrada Chanaral Alto en naranja y el flujo de la quebrada del Río Salado en amarillo.	28
Figura 20: Imagen satelital de Google Earth año 2015 modificada mostrando la escorrentía superficial en polígonos de borde negro y confluyendo a abanicos aluviales en naranja hacia el flujo aluvial en amarillo.	29
Figura 21: A la izquierda, la imagen satelital de Google Earth año 2015 modificada. Las líneas segmentadas muestran donde empieza el cambio de coloración del lecho de la quebrada Rio Salado. A la derecha se observa una fotografía del drenaje hacia el rio Salado.	30
Figura 22: Zoom de la bahía Chañaral de las Ánimas donde se observan dunas transversales de una mezcla de arenas naturales y “arena de relave”.	30
Figura 23: Fotografía panorámica mirando al oesteeste que muestra los socavones del sector norte de la playa de Chañaral.	31
Figura 24: Imagen satelital de Google Earth año 2016 modificada donde se observan las distintas líneas de costa extraída de fotos áreas del vuelo Hycon (1954) y registro histórico de Google Earth.	32
Figura 25: Imagen satelital del SAF del 28de marzo del 2015 modificada donde se representa la ubicación de las distintas facies definidas.	33
Figura 26: Simbología de las columnas estratigráficas de las facies a,b,c,d, e y f.	34
Figura 27: curva granulométrica acumulada facies a y su correspondiente columna estratigráfica.	35
Figura 28: curva granulométrica acumulada y su correspondiente columna estratigráfica de la facies b.	36
Figura 29: curvas granulométricas acumulada y su correspondiente columna estratigráfica de la facies c.	37
Figura 30: curva granulométrica acumulada de la facies d y su correspondiente columna estratigráfica.	37
Figura 31 : curva granulométrica acumulada facies e y su correspondiente columna estratigráfica.	38
Figura 32: : curva granulométrica acumulada facies f y su correspondiente columna estratigráfica.	39
Figura 33: Correlación alturas de inundación con la ubicación de las Facie. Imágenes satelitales extraídas de Google Earth.	39
Figura 34: Gráfico que ilustra el cambio en la granulometría del flujo aluvial de este a oesteeste (izquierda a derecha). Los puntos indican el promedio de la	

muestra representada (triángulo indica una muestra superior del depósito, la curva morada con asteriscos corresponde a la asimetría.	40
Figura 35: Gráfico que ilustra el cambio en la granulometría del flujo aluvional de las facies a y b, de este a oeste (izquierda a derecha). Los puntos indican el promedio de la muestra representada (triángulo indica una muestra superior del depósito), la curva morada con asteriscos corresponde a la asimetría.	41
Figura 36: Esta curva ilustra la variación en los puntos de truncamiento y pendientes de poblaciones individuales, entre distintos ríos.. Modificada de Visher (1969).	42
Figura 37: Curvas granulométricas acumulativas en escala probabilística de las muestras de la facies a. Línea roja indica población de tracción, verde de saltación y azul de suspensión.	43
Figura 38 : Curvas granulométricas acumulativas en escala probabilística de las muestras de la facies b. Línea roja indica población de tracción, verde de saltación y azul de suspensión.	44
Figura 39 Curvas granulométricas acumulativas en escala probabilística de las muestras de la facies c. Línea roja indica población de tracción, verde de saltación y azul de suspensión.	46
Figura 40: Curva granulométrica acumulativa en escala probabilística de la muestra de la facies d. Línea roja indica población de tracción, verde de saltación y azul de suspensión.	46
Figura 41: Curvas granulométricas acumulativas en escala probabilística de las muestras de la facies e. Línea roja indica población de tracción, verde de saltación y azul de suspensión.	47
Figura 42 Curvas granulométricas acumulativas en escala probabilística de las muestras de la facies f, en conjunto con su columna tipo. Línea roja indica población de tracción, verde de saltación y azul de suspensión.	48
Figura 43 : Triángulos de clasificación de los sedimentos mayores a 2mm . A la izquierda clasificación QFL y a la derecha clasificación de fragmentos líticos.	50
Figura 44 Triángulos de clasificación de los sedimentos menores a 2mm. A la izquierda clasificación QFL y a la derecha clasificación de fragmentos líticos.	50
Figura 45: Grafico caudal versus tiempo con el detalle de los datos en su respectiva hora (Representación de los datos de Naranjo et al., 2015)	51
Figura 46: Comparación del drenaje modelado en lahaz con el realizado por SERNAGEOMIN (SERNAGEOMIN,2010) y el mapeo realizado del aluvión-	53
Figura 47: comparación de la modelación de drenaje en LAHARZ usando DEM STRM 30 (izquierda) con el drenaje superficial observado en las imágenes satélites	53
Figura 48:Imagen DEM STRM30 donde se observan las localidades principales, el límite de la cuenca, la red de drenaje principal, el mapeo de la inundación del aluvión, la ubicación de los aportes principales que confluyeron al río salado y el punto de partida de la modelación con LAHARZ.....	54
Figura 49 : Resultado de la modelación con el nuevo script en LAHARZ, desde el punto de partida mencionado anteriormente (simbología de colores se muestra en detalle en la Figura 49.	55
Figura 50 : Zoom en la ciudad de Chañaral mostrando el resultado de la modelación en LAHARZ. La leyenda corresponde a los siguientes valores de	

volúmenes; verde (2)= $1,35 \times 10^8 \text{ m}^3$, azul(3)= $1,3 \times 10^8 \text{ m}^3$, naranja(4)= $1,25 \times 10^8 \text{ m}^3$, fucsia(5)= $1,2 \times 10^8 \text{ m}^3$, celeste(6)=Volumen integrado ($113.109.715 \text{ m}^3$), calipso(7)= $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ y verde oscuro(8)= $9,8 \times 10^7 \text{ m}^3$	56
Figura 51 : Mapa conceptual del aluvión de Chañaral.	57
Figura 52 Fotografía de un camión de transporte de Ácido Sulfúrico en la desembocadura del Río Salado en la ciudad de Chañaral que representa la capacidad de transportar “clastos” tamaño bloque.....	58
Figura 53 : Grafico cuadal tiempo donde se hacen un análisis comparativo con distintos flujos mencionados en la figura.la línea punteada refleja que no existe datos en esa zona.	58
Figura 54: A: Curvas de caudal en el tiempo en las tres ciudades de la quebrada del Río Salado, simuladas con el Modelo de Manejo de Agua de Tormenta (Storm Water Management Model (SWMM)), para una concentración de sedimento de factor 0.2. El tiempo del eje X es del día 23 de marzo 2015. B: Resultados de la estimación del peak que descarga en Chañaral según el coeficiente de escorrentía (C_r). Tomado de Wilcox et al. (2015).....	60
Figura 55 : Tabla de clasificación de tamaño de flujos (Fell, 1994).	63
Figura 56 : Imagen DEM que muestra la morfología de “embudo” de la cuenca con su drenaje principal, el mapeo de la inundación del aluvión y las ciudades principales	65
Figura 57: Terrazas de la ciudad de Chañaral. A la izquierda se ve la imagen satelital en planta de la ciudad de Chañaral con el límite delas terrazas determinado con los datos de GPS diferencial. El cuadrado representa al zoom presentado a la derecha donde se muestra la modelación en 3D realizada en Surfer.	66
Figura 58: A la izquierda se ve la imagen satelital en planta de la ciudad de Chañaral. El cuadrado representa al zoom presentado a la derecha donde se muestra la modelación en 3D realizada en Surfer de la topografía(naranja) y de la inundación(azul) con los datos sacados en terreno.	66
Figura 59: Representa a la Figura 24 modificada, agregando información de líneas de costa extraída de Paskoff y Petiot (1990). La distinta fuente de datos se encuentra representada en Tabla 12.	68

Índice de Tablas

Tabla 1: Datos meteorológicos del evento de Marzo 2015. Extraído del Informe Evento Meteorológico de CODELCO (2015).....	12
Tabla 2 : Tabla resumen de los constantes para distintos tipos de flujo extraídos de Griswold y Iverson (2008)	20
Tabla 3: Tabla resumen de los datos de área transversal y área planimétrica y sus respectivas constantes asociadas.....	21
Tabla 4: Resumen de los datos obtenidos en terreno sobre los niveles de inundación y depósito del aluvión en Chañaral marzo 2015.	22
Tabla 5: Áreas de inundación de acuerdo al mapeo realizado en imágenes satelitales de Google. El área ciudad Chañaral* se encuentra incluido en el área Chañaral-Salado	27
Tabla 6: Datos estadísticos de los cambios en la línea de costa en el tiempo, mostrando su mínimo, máximo, promedio y desviación.....	32
Tabla 7: Información granulométrica de las distintas facies, de acuerdo al método de Folk (1966).(Leptocurto con negritas es muy leptocurto).	33
Tabla 8: Composición de los clastos menores a 2 mm de las muestras del aluvión	49
Tabla 9: Composición de los clastos mayores a 2 mm de las muestras del aluvión.	49
Tabla 10: Fórmulas empíricas con sus respectivos tipos de flujo, autores y volumen.....	51
Tabla 11: Volumen inferido del aluvión.	64
Tabla 12: Tabla sobre la fuente y escala de las distintas líneas de costa de la Figura 56 Los años con asterisco es información extraídos de Paskoff y Petiot (1990). Doble asterisco son datos del Vuelo Hycon 1954 que coincidieron con los datos de Paskoff y Petiot(1990).	68
Tabla 13: Datos de altura de depósito con su respectiva altura sobre el nivel del mar calculado con la interpolación generada con los datos obtenidos del GPS diferencial.....	1
Tabla 14: Datos de altura de Inundación con su respectiva altura sobre el nivel del mar calculado con la interpolación con los datos de GPS diferencial.	3
Tabla 15: Datos pertinentes a las muestras tomadas en terreno. Las coordenadas se encuentran en UTM y el peso está medido en gramos. En las facies, cada letra corresponde a una de las facies definidas en Resultados, donde (i) significa parte inferior del depósito y (s) parte superior. En la composición, los valores de la izquierda corresponden a los sedimentos mayores a 2 mm y los de la derecha, a los menores a 2 mm.....	1
Tabla 16: Ecuaciones de las regresiones lineales de los tramos de la curva caudal tiempo representada en la Figura 43. La Tabla presenta sus respectivas integraciones que evaluada en sus límites representan el Volumen del flujo aluvial.	2

1 Introducción

1.1 Antecedentes Generales

El 24 y 25 de marzo de 2015 se registró un gran temporal en el norte de Chile, debido a un núcleo frío en altura el cual generó precipitaciones de carácter convectivo en las regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo. Estas altas y anómalas precipitaciones en un periodo corto de tiempo, generaron flujos aluviales que afectaron el río Salado, Copiapó, Taltal, Tierra Amarilla y Alto del Carmen. Específicamente en la zona de estudio que es la quebrada del Río El Salado, las precipitaciones alcanzaron los 90 mm (Bozkurt et al., 2016) y el flujo afectó principalmente las localidades de Llanta, Diego de Almagro, El Salado y Chañaral. Este suceso de grandes dimensiones como se observa en la Figura 1 tuvo como consecuencias la muerte y desaparición de varias personas, grandes pérdidas materiales y un gran daño a la economía local, generando un problema social para los habitantes.



Figura 1: Compilación de fotografías que reflejan la intensidad y dimensiones del aluvión: Las imágenes superiores corresponden a la ciudad de Chañaral facilitadas por Pablo Collao y las inferiores son imágenes de la ciudad de Diego de Almagro, facilitadas por Álvaro Rojas.

Un aluvión se define como una remoción en masa y se caracteriza por el desplazamiento relativamente rápido de regolitos con abundante cantidad de agua bajo la influencia de la gravedad, lo que le otorga la forma de un líquido viscoso, capaz de transportar grandes bloques de rocas, árboles e incluso viviendas con relativa facilidad (Cruden y Varnes, 1996). Estas corrientes fluyen rápidamente por una quebrada, destruyendo todo a su paso con poca o nula advertencia. Pueden

extenderse varios kilómetros desde su punto de origen, aumentando considerablemente de tamaño a medida que incluyen árboles, rocas, y otros materiales que encuentren en su recorrido.

La zona de estudio abarca las localidades de Chañaral, Salado, Diego de Almagro y Llanta, situadas en la provincia de Chañaral en la Región de Atacama. Esta provincia está ubicada aproximadamente a 167 kilómetros al norte de Copiapó, la capital regional, la ruta de acceso se encuentra en la Figura 2.

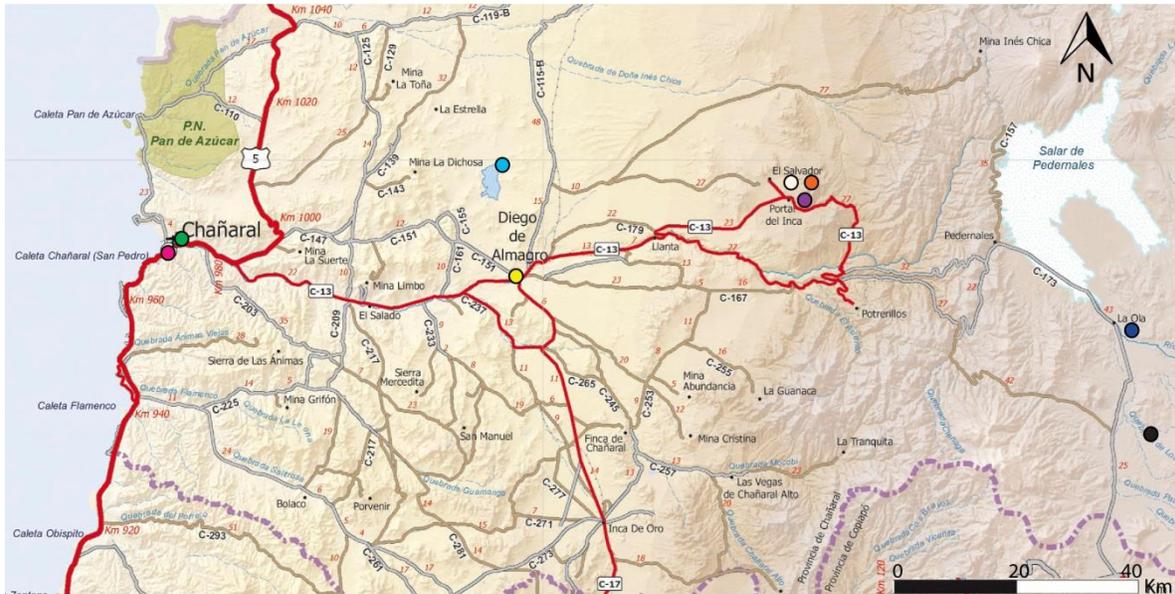


Figura 2: Mapa con rutas de acceso a la quebrada del Río Salado. Imagen modificada de la red caminera de Chile de MOP. Los puntos describen distintas estaciones meteorológicas (verde: Población Aeropuerto Chañaral, Rosa: Capitanía de Puerto Chañaral, Amarillo: Pampa Austral Sur, Celeste: Pampa Austral Norte, Morada: Intelec, Blanca: Estación Cine Inca, Naranja: Cobresal, azul: La Ola, negro: Quebrada los arroyos).

Estas altas y anómalas precipitaciones que provocan estos catastróficos aluviones preocupan a la comunidad y podrían intensificarse en el contexto del cambio climático global, respecto del cual la comunidad científica internacional está cada vez más de acuerdo (IPCC, 2014).

El presente trabajo aborda el estudio de las características físicas del flujo a partir de la composición y textura de los depósitos, los factores geomorfológicos que influyeron en el comportamiento de éste, los cambios geomorfológicos que dejó, junto con una modelación 2D del flujo con herramientas computacionales.

1.2 Contexto histórico

La ciudad de Chañaral fue fundada un 26 de octubre de 1833, como resultado de la instalación de faenas mineras en la zona, transformándose hacia el año 1875 en el puerto fronterizo en el norte de Chile (Monroy et al., 2000).

La Bahía de Chañaral de Las Ánimas, en Figura 3, se ha visto expuesta a distintos desastres naturales y antropológicos a lo largo de los años, los cuales han

cambiado su morfología. Los registros históricos hablan de un maremoto en 1877 que inundó las calles centrales del puerto. Luego en 1922 otro maremoto de mayor envergadura azotó la ciudad, abarcando 60.000 m² de terreno el cual fue destruido (Monroy et al., 2000).

Existen registros de un Aluvión en 1940 que destruyó viviendas, interrumpió caminos y que afectó solo a la ciudad de Chañaral. En 1972 otro aluvión afectó a Chañaral y pueblos río arriba los cuales se inundaron y hubieron 700 damnificados en Chañaral y 400 en El Salado. Otra inundación en 1983 afectó la ciudad por una alza en el nivel del río causado por aumento en las precipitaciones.



Figura 3: (a) Fotografía de Chañaral después del maremoto de 1922 (b) Fotografía que muestra los destrozos e inundaciones causados por el aluvión del 1972 . Imágenes obtenidas en <http://www.museodeatacama.cl/>.

El comienzo del gran desastre ambiental que cambió la línea de la costa en la playa (Paskoff y Petiot, 1990) y generó anomalías de metales (Ramirez et al., 2005) en la Bahía de Chañaral se remonta a 1938, cuando colmados los embalses de vertidos de relaves mineros de Potrerillos, entonces de la empresa estadounidense *Andes Copper Mining Company*, se procedió a vaciar ese material al mar utilizando para ello el cauce del río Salado, que pasa por las localidades de Llanta, Diego de Almagro y El Salado antes de desembocar en la bahía antes mencionada (Monroy et al, 2000).

Luego de agotado el yacimiento de cobre de Potrerillos en 1959, se comenzó a explotar El Salvador y la descarga de relaves continuó vertiéndose al mar. Con la nacionalización del cobre en 1971, el yacimiento pasó a ser propiedad de Codelco Chile, empresa estatal que continuó utilizando el mismo sistema de evacuación de relaves en la Bahía de Chañaral.

En 1975 la División Salvador trasladó el vaciado de sus desechos 9 kilómetros al norte de Chañaral, en la Caleta Palitos. En 1990 por mandato de la Corte Suprema de Justicia, se habilitó un tranque de relave, terminando así el vaciado a los ríos (Cortés, 2010; Monroy et al., 2000).

1.3 Hipótesis

Grandes precipitaciones anómalas como las de marzo del 2015 en la pre-cordillera y cordillera norte de Chile, cuyas cuencas hídricas disponen de gran

cantidad sedimento no consolidado removible, generan aluviones que producen modificaciones en la topografía ya sea por la erosión o por el depósito que deja el pasar del flujo provocando un alto impacto en las comunidades que viven aledañas al río, especialmente en este caso Chañaral. A esto se le suman factores como la morfología de la cuenca, geomorfología de las terrazas de Chañaral, el diseño de la ciudad y cambios antrópicos en el Salar de Pedernales y los relaves en la Bahía de las Ánimas de Chañaral los cuales pudieron haber influido en el impacto del flujo. Los antecedentes disponibles hacen suponer que el flujo cambió su composición de agua y barro a lo largo de su recorrido pasando por flujo hiperconcentrado a un flujo de detrito, para luego transformarse en un flujo de barro a llegar a la ciudad de Chañaral. Estos datos tendrían implicancias en la composición, dinámica y concentración de los flujos. Estas diferencias podrían tener gran importancia para determinar la modelación computacional del flujo y analizar el peligro asociado. Por otro lado, el aluvión de marzo de 2015 causó una importante erosión de la playa, dejando al descubierto secciones que evidencian la acumulación de los relaves mineros antes mencionados al igual que otros eventos de peligros geológicos.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Determinar las condiciones para la ocurrencia del aluvión a partir de la caracterización y análisis de sus depósitos e inundación, junto con la comprensión de su comportamiento de la inundación a través de observaciones de campo y la simulación del evento.

1.4.2 Objetivo Específico

- Determinar las características del flujo a partir de sus depósitos.

- Evaluar los parámetros físicos del flujo a partir de su simulación con herramientas computacionales, contrastado con observaciones de campo.

- Evaluar la evolución histórica de la línea de costa de la ciudad de Chañaral.

1.5 Marco Teórico de la zona de estudio

Para contextualizarnos en la zona y en el estudio es necesario tener una base teórica sobre la geología, geomorfología, hidrografía y clima los cuales se presentan a continuación.

1.5.1 Marco geológico de la Hoya de El Salado

La recopilación de la información geológica se realizó a partir de las cartas geológicas realizadas por Servicio Nacional de Geología y minería de El Salvador Occidental (Godoy y Lara, 2005), El Salvador (Cornejo et al., 1998, 2003) y de Potrerillos (Tomlinson et al., 1998) y se presenta en la Figura 4.

A continuación, se describe la geología regional de la zona de estudio.

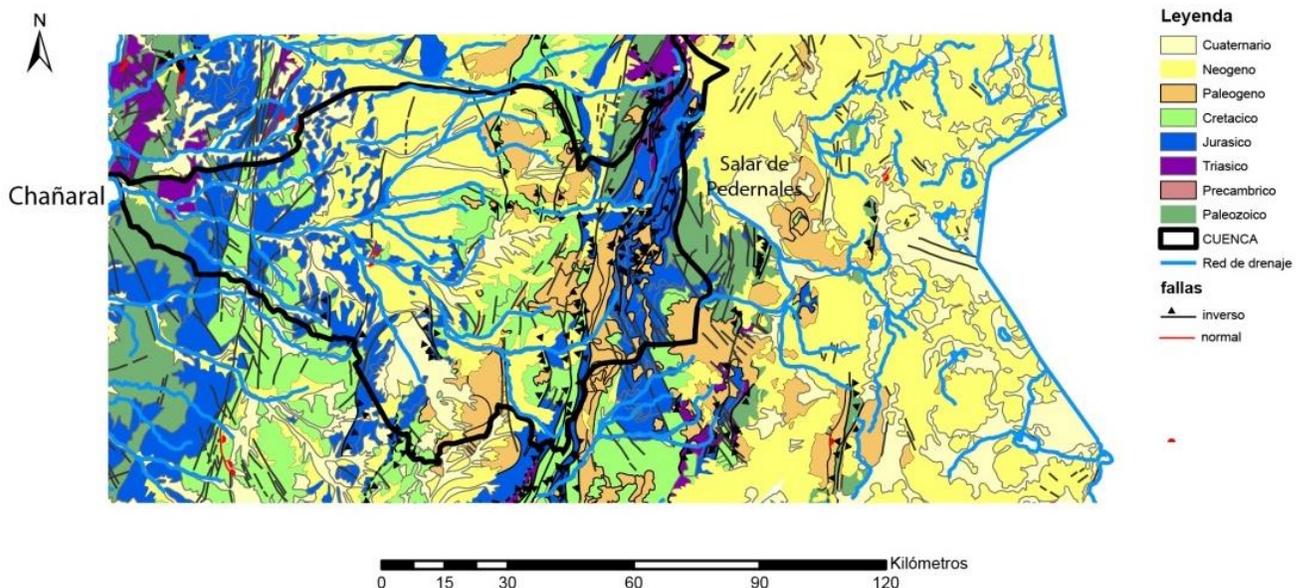


Figura 4: Mapa geológico de la zona de estudio modificado del Mapa de Chile de escala 1:1000000 (SERNAGEOMIN, 2010)

1.5.1.1 Paleozoico

En la zona de estudio se encuentran dos unidades estratificadas importantes del Paleozoico. La primera corresponde al **Complejo Epimetamórfico Chañaral** (Devónico – Carbonífero), complejo metamórfico de bajo grado con facies de metaturbiditas, *melánge*, metacalizas y metabasitas. Este complejo se ubica adyacente a la costa de la zona de estudio. La segunda unidad es la **Formación La Tabla** (Paleozoico superior), de carácter volcánico-continental (tobas soldadas y brechas riolíticas). Esta formación se ubica desde el sector del Peñón de Pedernales hacia el sur (Tomlinson *et al.*, 1998).

En la zona del Salar de Pedernales tres intrusivos: **Granitoides de Montandón** (Pérmico), al sur de la Quebrada el Jardín, y los **Batolitos Pedernales** y **Sierra**

Castillo, ambos del Pérmico y de composición intermedia a félsica. Se ubican en el borde sur-oeste del Salar de Pedernales y al este de la falla Sierra Castillo, respectivamente.

1.5.1.2 Mesozoico

Al norte de Chañaral, fuera de la cuenca del río Salado, se ubica la **Formación Agua Chica** (Triásico superior), compuesta de conglomerados, areniscas con fósiles, lavas y tobas de ambiente fluvial. Hacia la zona de Pedernales, se tiene la **Formación Quebrada del Salitre** (Triásico superior – Jurásico inferior) de origen volcánico – sedimentario (marino y continental), con facies de lavas y brechas basálticas, areniscas, conglomerados y calizas, domos y lavas riolíticas. Aflora en la quebrada del Río Salado cuando toma dirección norte-sur.

Cerca de Chañaral Salado y la quebrada Peralillo, más hacia el este de la ciudad. En el sector occidental del Río Salado, al norte de la quebrada (en la Sierra Albayay) aflora la **Formación La Negra** (Pliensbachiano – Jurásico Superior), que se compone de secuencias de lavas andesítico-basálticas y sucesiones marinas carbonatadas y epiclásticas. Hacia el este, cerca de Diego de Almagro, se observan afloramientos del **Grupo Punta del Cobre** (Jurásico Superior – Cretácico Inferior), correspondientes a secuencias de lavas con intercalaciones de rocas sedimentarias carbonatadas y tobáceas. Cerca de El Salvador, aflorando en la quebrada del río Salado se encuentra la **Formación Sierra Fraga** (Jurásico Medio – Cretácico Inferior) que se compone de lavas y brechas andesíticas y andesítico-basálticas, con intercalaciones calcáreas de ambiente marino. Ya en el sector de Pedernales afloran las **formaciones Montandón** (Pliensbachiano – Bajociano medio), de carácter sedimentario marino, y **Asientos** (Bajociano – Caloviano), también sedimentaria marina; los **Estratos de Quebrada Vicuña** (Jurásico Medio – Superior), correspondientes a una formación volcánica con intercalaciones marinas de carbonato, y la **Formación Pedernales** (Titoniano – Valanginiano), que es una unidad sedimentaria continental.

Entre Chañaral y Diego de Almagro afloran tres plutones del Jurásico Inferior, de composición granodiorítica: **Plutón Peralillo**, que se emplaza en el Cerro Chañaral, al norte de la misma ciudad, el Plutón Barquito, emplazado en la Caleta Barquito al sur de Chañaral, y el **Plutón Flamenco**, emplazado en algunos sectores del Cerro La Chañarala. Al oeste del Sistema de Fallas de Atacama se emplaza el **Plutón Las Ánimas** (Jurásico Medio – Jurásico Superior), en el sector de Pampa Negra, este intrusivo es de composición diorítica y en algunos afloramientos, gabros. Finalmente, en la quebrada del Río Salado cerca de Pedernales se emplazan **Filones hipabisales andesítico-basálticos** (Jurásico Medio – Superior), orientados norte-sur.

1.5.1.3 Cretácico

Aflorando al sur de Diego de Almagro, en la Sierra Santo Domingo, se encuentra el **Grupo Chañarcillo** (Berriasiano – Barremiano), compuesto por secuencias de areniscas y calizas coquináceas. De manera extensa, en el sector de El Salvador,

aflora la **Formación Llanta** (Campaniano – Maastrichtiano), compuesta por secuencias volcánicas y sedimentarias con 3 miembros definidos (nivel inferior sedimentario, nivel intermedio sedimentario-volcánico y nivel superior volcánico). Ya en el sector de Pedernales, entre las Quebradas Las Tablas y Agua de León, se encuentra la **Formación Agua Helada** (Cretácico inferior), correspondiente a una formación sedimentaria continental

Al oeste del SFA, en el pueblo de El Salado, se emplaza el **Plutón Las Tazas** (Cretácico Inferior), de composición granodiorítica, cortado por filones andesíticos. Al este de la localidad de El Salado (y al este del SFA) se emplaza el **Plutón Sierra Aspera** (Cretácico Inferior), compuesto de dioritas con enclaves y filones de composición variada. Al sur del Cerro Salado se ubica el cuerpo intrusivo **Plutón Sierra Dieciocho**, formado por dioritas cuarcíferas y granodioritas. En Pampa Austral afloran los **Pórfidos dacíticos Pampa Austral** (Aptiano – Cenomaniano), compuestos por cuellos volcánicos, domos y lavas domo con composición dacítica. Al sur de la Sierra Luján, aflora el **Plutón Sierra Merceditas** (Aptiano – Cenomaniano), en la sierra del mismo nombre, correspondiente a un stock de tonalitas. Hacia el sector de El Salvador se tienen varios pórfidos andesíticos: **Pórfidos andesíticos de piroxeno de Sierra Los Amarillos** y **Pórfidos andesíticos de hornblenda y piroxeno de Sierra Caballo Muerto**. Cerca de estos pórfidos, se emplazan las **Monzodioritas y monzonitas cuarcíferas de Sierra Caballo Muerto, Quebrada del Salado y Sierra Miranda** (Cretácico Superior alto). Finalmente, en la Quebrada Asientos, hacia Pedernales, se emplazan **Pórfidos, diques y filones andesíticos** (Cretácico Superior).

1.5.1.4 Cenozoico

La **Formación El Salvador** (Paleoceno medio – superior), que aflora en la ciudad del mismo nombre, corresponde a una formación volcánica piroclástica riolítica, con intercalaciones de lavas andesíticas y dacíticas vítreas. En Potrerillos, hacia el este, afloran los **Estratos de Cerro Valiente** (Paleoceno), correspondiente a una secuencia volcánica efusiva y piroclástica (lavas, brechas, tobas e ignimbritas, de composiciones andesíticas a riolíticas). Los **Estratos de Cerro el Buitre**, en el sector Salar de Pedernales, corresponde a una secuencia estratificada volcanoclástica y sedimentaria (depósitos block and ash y conglomerados).

Aflorando al sur de la Quebrada del Salado (sierra Caballo Muerto) y cerca de El Salvador, se tienen los **Pórfidos dacíticos y daciandesíticos de piroxeno y biotita de la Sierra Caballo Muerto** (Paleoceno superior), que forman stocks porfídicos. Cerca de El Salvador también, se tienen los **Gabros y dioritas del Cerro La Cruz** (Paleoceno superior), siendo intrusivos afaníticos máficos. En la ladera oeste del sector de la quebrada San Juan afloran los **Domos riolíticos y riolíticos del Cerro Indio Muerto y San Juan, lacolitos y diques asociados** (Paleoceno superior), correspondiente a complejos extrusivos que se unen con depósitos piroclásticos y epiclásticos asociados. Cerca de El Salvador, se emplazan las **Monzonitas cuarcíferas, monzodioritas y pórfidos monzoníticos de La Cantera** (Paleoceno superior), que afloran en forma de stocks con

diaclasamiento columnar, y cerca de estos los **Pórfidos y domos riolíticos de Kilómetro Catorce y Pampa del Inca** (Paleoceno superior). En el Eoceno se tienen los **Pórfidos andesíticos, daciandesíticos y microdioríticos**, las **Granodioritas y monzodioritas cuarcíferas del Cerro Vicuña** y los **Pórfidos riódacíticos del Campamento Antiguo, lacolitos y diques asociados**. Camino a Pedernales, al sur de Potrerillos, se emplaza el **Domo riolítico de Potrerillos** (Paleoceno), compuesto por riolitas fluidales. Luego se emplazan stocks de **Monzonitas y monzodioritas** (Paleoceno) y finalmente, stocks, diques y filones de **Pórfidos dioríticos y diques andesíticos de piroxeno** (Paleoceno).

Las **Gravas de Atacama** (Mioceno Medio), son depósitos no consolidados muy extensos en la zona de estudio, estos se conforman de gravas polimícticas, ripios mal seleccionados y arenas gruesas de tonos grises. Más recientes son los **Depósitos coluviales inactivos** (Plioceno – Pleistoceno), compuestos de gravas, arenas y limos de laderas y que son cortados por el drenaje actual, formando parte de las terrazas de los ríos. Hacia El Salvador se encuentran depósitos de la **Ignimbrita San Andrés** (Mioceno superior), asociada a un flujo piroclástico de composición riolítica. En cercanías a El Salvador, de forma extensa se encuentran los **Depósitos aluviales y coluviales antiguos** (Mioceno Superior – Plioceno), compuestos de clastos monomícticos angulosos, con mala selección. En algunas zonas pueden presentar niveles de tobas. Río arriba, hacia Pedernales, se ubican los depósitos de la **Ignimbrita Los Cristales** (Mioceno medio), asociada a un flujo piroclástico de composición riolítica. En el sector del Salar de Pedernales, se encuentran los **Aparatos Volcánicos Centrales y Campos de Lavas** (Mioceno medio) del volcán Cerro Doña Inés, que contienen conos volcánicos con domos centrales, flujos piroclásticos que los rodean y lavas, en menor cantidad. En la ladera occidental del Cerro Doña Inés se encuentra la **Ignimbrita Inés Chica** (Mioceno medio), de composición riolítica; y finalmente en el mismo salar se encuentran **Depósitos salinos antiguos del Salar de Pedernales** (Mioceno superior – Plioceno), compuestos por sulfatos y limos salinos, con boratos y anhidrita.

1.5.1.4.1 Cuaternario

Dentro de los depósitos no consolidados del Cuaternario, se encuentran **Depósitos eólicos y de playa**, compuesta de arenas finas en la zona de la costa, **Depósitos coluviales**, de composición monomíctica ubicándose en las laderas de cerros, **Depósitos aluviales**, gravas, arenas y limos de selección variable asociados a flujos de barro, y hacia el Salar de Pedernales los **Depósitos salinos recientes del Salar de Pedernales**, con costras de limos salinos húmedos y de halita suave y húmeda. Se incluyen los **Depósitos antrópicos** (Holoceno) asociados a depósitos de relave del Yacimiento El Salvador.

1.5.2 Geología estructural regional

A lo largo de la hoya del río Salado varias estructuras mayores, como fallas, atraviesan el camino de los ríos y, en algunos casos, modelan también aspectos morfológicos de estos valles. Lo más destacable en cuanto a geología estructural

es la presencia del **Sistema de Fallas de Atacama** (SFA) (Arabasz, 1970), que aparece en trazas norte sur y fallas secundarias de rumbo noreste (**Falla Cerro Salado**) en los sectores de Chañaral y Diego de Almagro. Se observa en general un manteo hacia el este de las formaciones del Jurásico y del Cretácico, debido a un régimen tectónico de extensión. Más hacia el este se mantiene la presencia de fallas de rumbo norte-sur y algunas noroesteeste o noreste, de menor orden que las del SFA, asociadas a la zona de El Salvador. Estas fallas en general cortan el cauce del río pero no van a modelar su morfología en gran medida. Ya hacia el límite oriental del área de estudio, se tienen varias fallas de rumbo nor-noreste, como la **Falla Sierra Castillo, Barrancas, Río de la Sal, Casa de Fuerza, El Buitre** y **Agua de la Piedra**, entre otras fallas menores de rumbo similar. Estas fallas son más importantes geomorfológicamente hablando, ya que muchos valles de esta zona se alinean en base a estas estructuras, sobre todo el del río de la Sal, que se alinea con la falla del mismo nombre. Además, este “sistema” de fallas limita la cuenca endorreica asociada al Salar de Pedernales.

1.5.3 Hidrografía y relieve de la hoya del río Salado

Esta cuenca exorreica posee una extensión de 7400 km². Limita al norte con cuencas menores, secas, del extremo sur del Desierto de Atacama; al sur limita con la hoya de la Quebrada Flamenco y con la hoya de la quebrada de Paipote más hacia el este, la cual es afluente del norte del río Copiapó (Niemeyer, 1980).

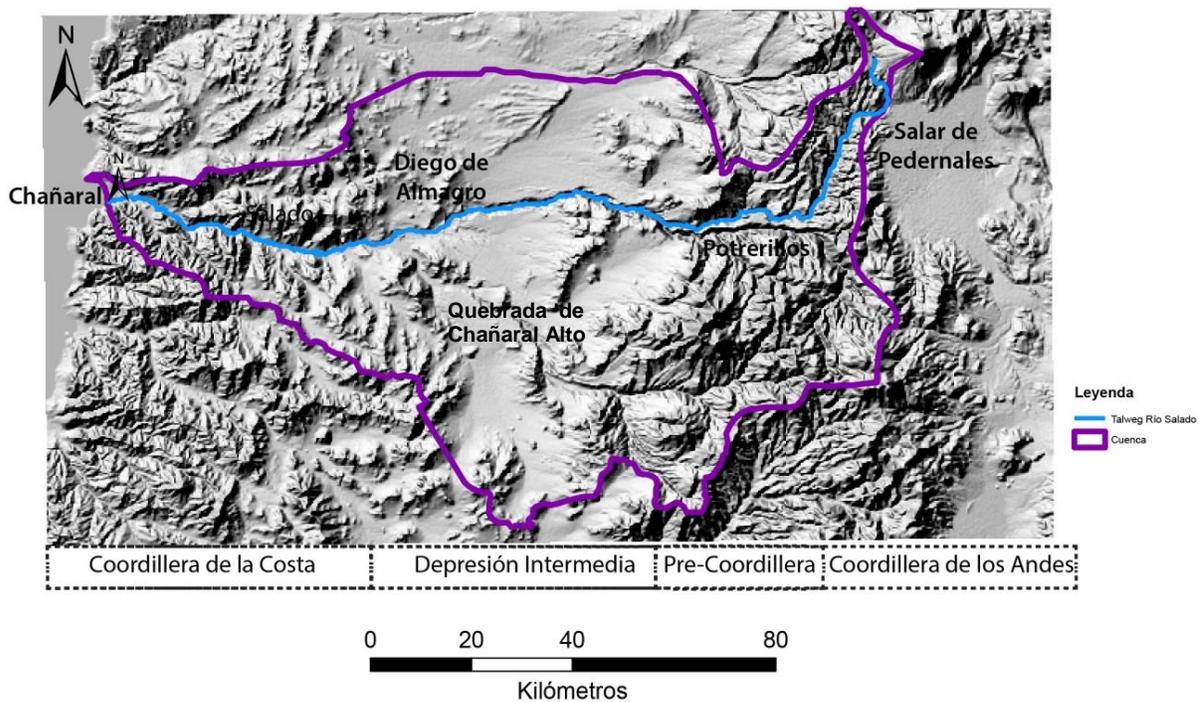


Figura 5 : Imagen DEM STRM 30 modificada con la morfología de la cuenca, el talweg en azul del río Salado extraído con Rivertools y los lugares principales de la zona. En líneas punteadas se muestra límites aproximados de los rasgos morfológicos principales.

Al este queda separada de la cuenca endorreica del Salar de Pedernales por un cordón en la cual descuellan los cerros Bravo (5280 m s.n.m.) y Blanco (4390 m s.n.m.) y los portezuelos Salitre (3860 m s.n.m.), Asienta, Tablas y del Salado. Este límite oriental, en su porción norte coincide con el extremo sur de la cordillera Domeyko, donde destaca el cerro Doña Inés (5070 m s.n.m.). La cabecera principal del río Salado como se muestra en la Figura 5 tiene su origen en las Vegas de Vicuña, al pie occidental del Cerro Doña Inés. Desarrolla su curso en un cañón profundo como se observa en la Figura 6 de dirección SSW por espacio de 50 km, hasta la estación Montandén del ferrocarril Barquito-Potreriños. En este punto, el cajón toma franco rumbo al oesteeste, hasta la desembocadura en el mar, tras un recorrido de otros 135 km. Recibe en la precordillera andina varias Quebradas tributarias, entre las cuales tal vez la más importante sea la de Asientos, que le cae desde el sur. En el curso medio recibe por el costado sur, cerca de la estación ferroviaria Empalme (de Pueblo Hundido), la quebrada de Chañaral Alto conjuntamente con la de Angostura. En la primera se sitúa la localidad Finca de Chañaral. Casi en la desembocadura hacia el mar, le desemboca desde el sur la quebrada de Las Ánimas, y algo más al interior la quebrada de El Saladito.

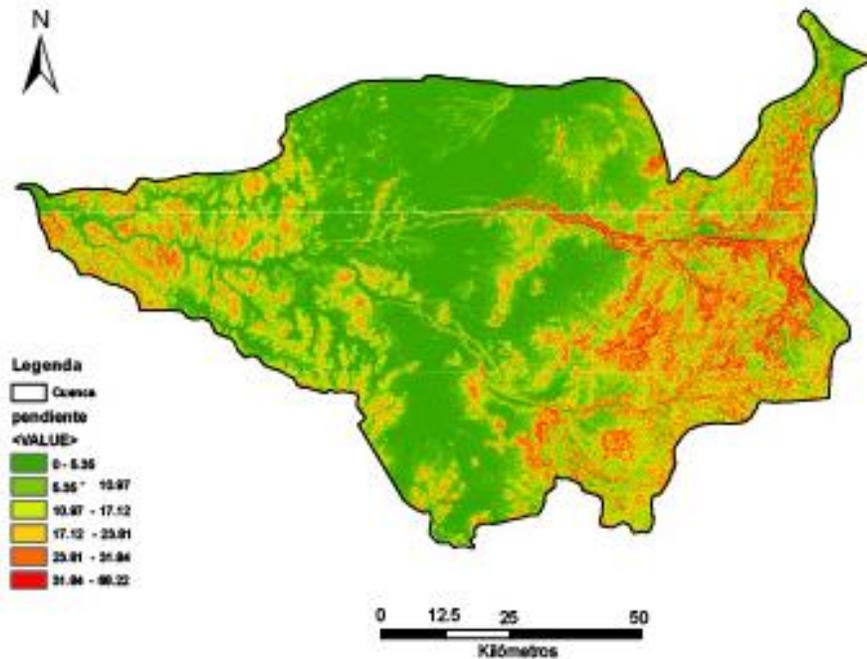


Figura 6: Morfología de la cuenca de Río Salado con su mapa de pendientes.

En la Figura 6 se observa un mapa de relieves realizado en ArcGis usando el DEM STRM30.

1.5.4 Marco climático

1.5.3. General

La zona de estudio se encuentra en la transición entre la zona hiper-árida y la zona semi-árida la cual se caracteriza por neblinas costeras llamadas Camanchaca. Esta neblina cargada de agua ayuda al crecimiento de vegetación, apareciendo en algunas lomas y el límite sur del altiplano, siendo una fuente importante de agua en el sector costero. Las precipitaciones en la ciudad de Chañaral no superan los 1,7 mm/año (Julià et al., 2008) mientras que en Potrerillos (sector alto de la cuenca) las precipitaciones pueden alcanzar los 52 mm/año (Almeyda y Saez, 1958; Hajek y di Castri, 1975). Según su circulación atmosférica esta zona se encuentra en la zona de los anticiclones subtropicales (Strahler y Strahler, 1986; Aguado y Burt, 2004), específicamente el Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur (ASPS), la cual bloquea frentes climáticos, la cual genera precipitaciones anómalas. Otro factor climático es el cinturón de vientos Alisios desde la vertiente amazónica que aparecen en la alta cordillera y la surgencia de aguas profundas (Fuenzalida 1965; Garreaud et al., 2003, 2007; Houston y Hartley, 2003).

La combinación de estos factores, la corriente fría de Humboldt y la presencia de la Cordillera de los Andes (Montgomery et al, 2001) modelan el clima de la región, el cual se puede caracterizar en tres zonas climáticas:

- 1.- Zona de neblinas costeras
- 2.- Zona de influencia del sistema amazónico de lluvias estivales en alta cordillera
- 3.- Zona árida en el resto del territorio dominad por el ASPS (Miller, 1976)

Si bien la lluvia es escasa, existen al menos dos sistemas principales que generan precipitaciones en esta zona. Uno corresponde al debilitamiento del ASPS, transportados por los vientos del oesteeste, que asociados a latitudes medias pueden llegar a alcanzar latitudes más bajas, debido al desplazamiento al sur del ASPS, el cual a la vez se asocia a episodios El Niño (Juliá *et al.*, 2008).

El otro sistema principal está asociado a las precipitaciones estivales altiplánicas, más conocidas como “Invierno Boliviano”, donde la acción de una baja superficial altiplánica transporta humedad desde el este y precipita por convección, afectando el altiplano y la precordillera del norte de Chile (Garreaud *et al.*, 2003).

Adicionalmente, existen mecanismos fuera de estos dos sistemas que generan precipitación en el norte, donde la humedad es transportada desde el norte, es decir, desde la zona de convergencia inter-tropical,

1.5.3.2 Caso de estudio

La tormenta que afectó al norte del país tuvo una duración de tres días, partió el 24 de marzo con lluvia moderada aumentando en la noche, para luego ser el 25 de marzo el día con mayor intensidad como se observa en la tabla 1 en las distintas estaciones de la zona. Las lluvias continuaron levemente el 26 de marzo terminado así con las precipitaciones asociadas a este evento.

Tabla 1: Datos meteorológicos del evento de Marzo 2015. Extraído del Informe Evento Meteorológico de CODELCO (2015).

Estación Meteorológica	24-03-15 (mm)	25-03-15 (mm)	26-03-15 (mm)	Total (mm)
Cuenca de Pedernales				
Quebrada Los Arroyos	11	19	5.6	35.6
Estación La Ola	18.6	35.8	10.2	64.6
El Salvador				
Estación Cine Inca	15.5	58.4	3.5	77.4
Cobresal	15.5	56	4.5	76
Intelec	23.5	59.5	9.5	92.5
Depósito de Relaves Pampa Austral				
Pampa Austral Norte	2.5	39	0	41.5
Pampa Austral Sur	6	38	0	44
Chañaral				
Población Aeropuerto Chañaral	4.5	19.8	0	24.3

Capitanía de Puerto Chañaral	0	19.7	0	19.7
------------------------------	---	------	---	------

De acuerdo con el informe publicado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile el 2015, la tormenta ocurrió bajo un mecanismo de baja segregada, asociada a una anomalía cálida de temperatura superficial en las costas de Perú y Ecuador. La precipitación se acumuló principalmente en la alta cordillera de Atacama el día 24, extendiéndose hasta el 25 y luego desplazándose hacia el este.

2 Metodología

2.1 Dems

2.1.1 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global

Se utilizaron datos de SRTM de 30 m de precisión. La Aeronáutica Nacional y Administración Espacial (NASA) y la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (NGA) participó en un proyecto internacional para adquirir datos de radar los cuales fueron usados para crear el primer, casi global, conjunto de elevaciones de terreno con una resolución de 1 arco de segundo, lo que significa una resolución de aproximadamente 30 metros en planta, con una precisión de altura vertical absoluta de 16 metros y una precisión de la altura vertical relativa de 10 metros.

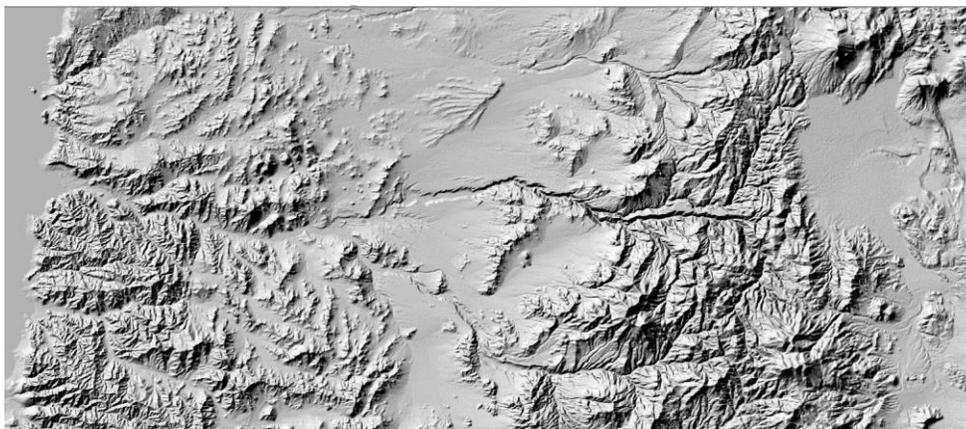


Figura 7: DEM generado a partir de STRM para la zona de estudio visto a una escala 1:500000.

2.1.2 GPS diferencial: toma de datos y procesamiento

Se tomaron observaciones de GPS diferencial (*Global Positioning System*) Mediante un trabajo sistemático desde el 28 de abril al 3 de mayo del 2015; utilizando un GPS marca Trimble modelo R6 se instaló una base en el estadio de Chañaral (punto rojo en Figura 9) para luego recorrer las calles de la ciudad de Chañaral en dirección E-O y N-S como se observa en la Figura 8. Se obtuvo una recopilación de 684 datos de altitud con precisión de 2 decimales. La distribución de los datos se observa en la Figura 9.



Figura 8: Toma de datos en la ciudad de Chañaral.

Usando estos datos se logró modelar la topografía de la parte baja de ciudad de Chañaral mediante dos métodos para distintos propósitos, con ayuda de los *softwares* Surfer 8 y ArcGIS, en ambos casos usando el método de interpolación *kriging*, que da la mejor estimación lineal insesgada de los valores de los puntos, esto es, elegir el promedio ponderado de los valores de las muestras la cual tenga la mínima varianza. Este método está aceptado como el mejor para la modelación de topografía especialmente cuando se trata de pocos datos (Chaplot et al, 2006) ya que logra una buena representatividad del relieve. En el caso de la modelación de Arcgis se agregaron parámetros como red de drenaje y curvas de nivel, que se observan en la Figura 9, para generar un DEM de mayor precisión.

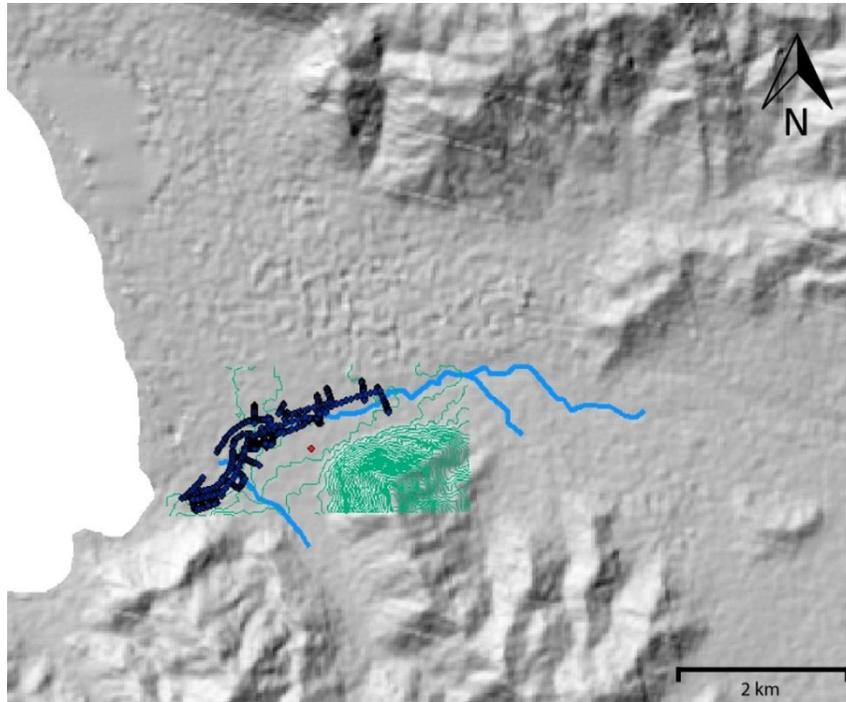


Figura 9: Zoom del DEM STRM de la ciudad de Chañaral, donde se observa en color azul los datos de Gps diferencial, el punto rojo de la estación base, la red de drenaje en azul y curvas de nivel en verde, acotadas a la zona de interpolación.

2.2 Características del flujo de marzo del 2015 y sus depósitos

2.2.1 Niveles de Inundación y depósito

Para el aluvión de marzo del 2015 el trabajo consistió principalmente en un levantamiento sistemático en búsqueda de marcas de inundación y depósitos que dejó el paso del aluvión en las construcciones de la ciudad de Chañaral como se observa en la Figura 10. Este levantamiento fue realizado en dos campañas de terreno los días 10 de abril al 15 de abril por el Dr. Gabriel Vargas y del 28 de abril al 3 de mayo del 2015 por el equipo conformado por el Dr. Gabriel Vargas, Dra. Linda Daniele, José González, Victor Grijalba, Carolina Valderas, Nicole Salas, Sergio Villagrán, Cristián Cerda y Fabiola González. Se usó la calle como nivel base con una precisión de 10 cm. La distribución de la información obtenida fue condicionada por la accesibilidad a los afloramientos y marcas. Se realizaron observaciones en alrededor de 45 puntos/localidades.



Figura 10: Imagen que muestra la metodología de cómo se tomaron los datos de altura de inundación y depósito.

Los límites de inundación se determinaron en terreno en distintos lugares de la ciudad, tal como se observa en la Figura 11, los cuales apoyan el mapeo realizado a partir de las imágenes satelitales, con el fin de generar una cartografía de áreas de inundación con mayor precisión.



Figura 11: Imagen donde muestra el límite de la inundación en la ciudad de Chañaral. (Fotografía facilitada por Pablo Collao, 2015).

2.2.2 Depósitos: Muestreo, análisis granulométrico y análisis litológico.

El trabajo de muestreo consistió principalmente en la toma de muestras de los depósitos dejados por el aluvión en la ciudad de Chañaral y sus cercanías. Se tomaron muestras representativas de los depósitos observados, y en algunos puntos se tomaron dos muestras: de un nivel inferior y de uno superior, que indicarían distintas facies en el flujo. El muestreo intentó cubrir las distintas etapas del aluvión: río arriba, entrando a Chañaral, y su bifurcación al sur y al norte, donde afectó a la ciudad y a la playa, respectivamente. Se analizaron en total 24 muestras de sedimento.

Las 24 muestras, posterior a su secado, se analizaron granulométricamente para así caracterizar los depósitos en distintas facies del evento. Las muestras fueron tamizadas en una serie de 13 tamices de la serie A.S.T.M., para luego generar curvas acumulativas semilogarítmicas (diámetro de partículas, ϕ versus porcentaje de peso). Para la sección fina de las muestras, la sección menor a 2 mm, se realizó un análisis granulométrico laser utilizando el Mastersizer 2000. Se usó principalmente la metodología para tamaño de partículas de Folk (1966), y en base a estos resultados se calculó la media, mediana, selección, asimetría y curtosis de cada muestra (Folk & Ward, 1957), para un análisis posterior de los depósitos y su relación con la caracterización del flujo.

Para analizar la composición, se realizó una observación macroscópica de un cuartil representativo de las secciones de las muestras sobre 1 mm, de modo tal que los clastos fueran descritos con lupa para ser caracterizados usando como guía la pauta de descripción de las rocas sedimentarias, para obtener información litológica, mineralógica al igual que su madurez textural (esfericidad y redondeamiento) y química.

2.2.3 Caudales y volúmenes

Ya que gran parte de la descarga del aluvión se fue por la bahía Chañaral de las Ánimas hacia el mar, el volumen del aluvión no podía ser calculado utilizando métodos como el usado en los depósitos laháricos del volcán Villarrica, donde se utiliza la información de área y espesor del depósito tomada en terreno (Castruccio, 2008). Ciertos parámetros relacionados con la dinámica del flujo son necesarios para calcular este volumen. Por lo cual se utilizaron los datos obtenidos por el Sernageomin, a partir de observaciones realizadas en tiempo real del evento. Datos de velocidad y caudal fueron presentados en el XIV Congreso Geológico Chileno en el trabajo “Descargas aluviales durante la tormenta del desierto de Atacama en marzo de 2015, Chile” de José Antonio Naranjo y Paula Olea-Encina. Información adicional fue extraída de la información periodística de la radio Cooperativa. Usando la información de los caudales en el tiempo, se graficaron y al ser integrado bajo la curva se obtuvo una estimación del volumen total

2.3 Modelación

2.3.1 Principios de Laharz

LAHARZ es un programa computacional escrito en lenguaje de programación Python implementado para ArcGIS, creado por el Servicio Geológico de Estados Unidos en 1998 (Iverson et al., 1998; Schilling, 1998) y luego actualizado el 2014, que permite delinear zonas de peligro volcánico por la inundación generada por flujos laháricos a través de un método semiempírico. Este tipo de modelación ha sido utilizado para modelar diversos lahares alrededor del mundo (Schilling et al., 2001; Canuti et al., 2002; Stevens et al., 2002; Castruccio 2008, entre otros).

El método utiliza una combinación de análisis dimensional y estadístico para determinar las áreas de inundación transversal (A) y planimétricas (B) generadas por el flujo lahárico que en este caso será un flujo aluvional, en función del volumen como se observa en la Figura 12.

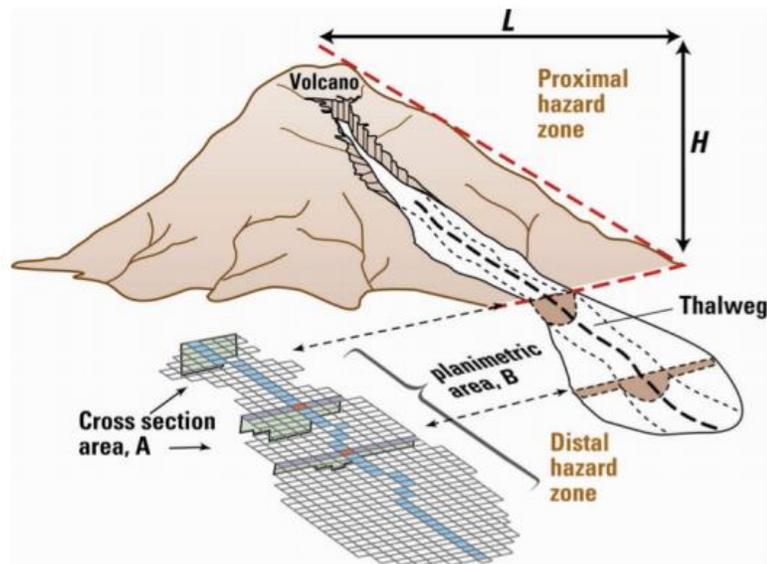


Figura 12: Sección transversal (A) y planimétrica (B) definidas para un lahar, que se utilizan en el programa LAHARZ. (Modificado por Schilling de Iverson et al, 1998)

Usando una serie de ecuaciones donde se asume un volumen constante, usando una masa y una densidad constante, se llega a las siguientes relaciones (Iverson et al., 1998):

$$A = CV^{2/3}$$

$$B = cV^{2/3}$$

Por lo que, según la teoría, V es el volumen del flujo, C y c son constantes adimensionales. Griswold y Iverson (2008) realizó análisis estadísticos con diferentes datos para llegar a una ecuación que relaciona áreas de inundación con un volumen de un flujo de detrito, representado en estas ecuaciones:

$$\log A = \log C + 23 \log V$$

$$\log B = \log c + 23 \log V$$

Estas ecuaciones muestran una dependencia lineal entre $\log A$ y $\log B$ con $\log V$, esto se ve reflejado en la Figura 13, donde se obtienen coeficientes de determinación (R^2) sobre 0,9. Esto corrobora la fuerte dependencia entre la sección transversal (A) y el área de inundación planimétrica (B) con el volumen de un flujo respectivamente.

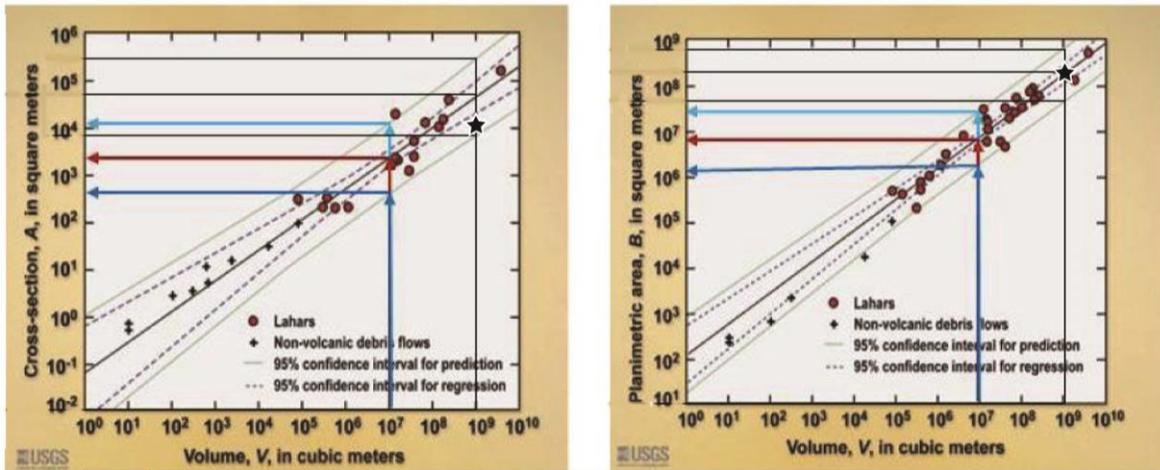


Figura 13 Gráficos Volumen versus Área, construidas utilizando los datos de lahares y de flujos no volcánicos. La estrella representa los datos del aluvión de Chañaral Marzo 2015 (Modificada de Iverson et al., 1998).

Con los datos estadísticos se lograron calcular las constantes necesarias para la modelación del flujo, siendo distintas para distintos tipos de flujos como se observa en la Tabla 2, donde variando la constante, la modelación se adecua mejor a los distintos casos.

Tabla 2 : Tabla resumen de los constantes para distintos tipos de flujo extraídos de Griswold y Iverson (2008)

Constantes	Avalancha	Flujo detritos	Lahar
C_A	0.02	0,01	0,05
C_B	20	20	200

2.3.2 Calibración y Condiciones de borde para la modelación del aluvión de marzo de 2015.

Para utilizar Lahar en el evento del aluvión de marzo de 2015 en el río Salado, se calcularon nuevas constantes para adecuarse a la sección transversal (A) y

planimétrica (B) del flujo. Con datos calculados en terreno, el mapeo del flujo realizado con imágenes satelitales y datos medidos por el SERNAGEOMIN se obtuvieron nuevas constantes representadas en la Tabla 3.

Tabla 3: Tabla resumen de los datos de área transversal y área planimétrica y sus respectivas constantes asociadas.

Ciudad	A(m)	B(m)		
Chañaral	1178	4637320		
Salado	4459	51380215	C_A	C_B
Promedio	2818	28008768	0.012	149

Las constantes C_A y C_B son reemplazadas en el código “distal inundation” para generar un flujo más representativo a lo ocurrido en Chañaral en Marzo del 2015.

Por otro lado, una condición de borde importante es la terraza ubicada en el lado SE de la ciudad de Chañaral, la cual coincidió con el límite de inundación y se ve representada en la modelación del 3D de la topografía.

Resultados: Caracterización del flujo de marzo de 2015, su impacto y sus depósitos.

3.1 Alturas de inundación, altura de depósito y mapeo de flujo.

3.1.1 Alturas de inundación y de depósito

En el caso particular de la ciudad de Chañaral, que fue donde se midieron el gran porcentaje de las alturas de inundación y de depósito, se pudo caracterizar en detalle la inundación especialmente en el casco histórico de la ciudad, donde la máxima altura fue de 4,2 m, mientras que el mayor espesor de depósito observado fue de 3,2 m, tal como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4: Resumen de los datos obtenidos en terreno sobre los niveles de inundación y depósito del aluvión en Chañaral marzo 2015.

Alturas	mínimo(m)	máximo(m)	promedio	desviación
Inundación	0,2	4,2	2,5	0,89
Depósito	0,1	3,2	1,6	0,78

Las mayores alturas de inundación y de depósito se encuentran ubicadas en la intersección entre la carretera y la desembocadura del río, como se observa en la representación de estas en la Figura 14, disminuyendo hacia el norte y también, en un área mayor, hacia el sur. La inundación abarcó ambas riberas del río. Para el lado sSur, derecha de la imagen, la inundación invade la ciudad y se observan mayores alturas que en el lado norte. En el lado sur se pudieron apreciar mejor que en el lado norte de la quebrada las marcas dejadas por el aluvión en las construcciones, mientras que para el lado norte la inundación afectó a la playa de Chañaral.

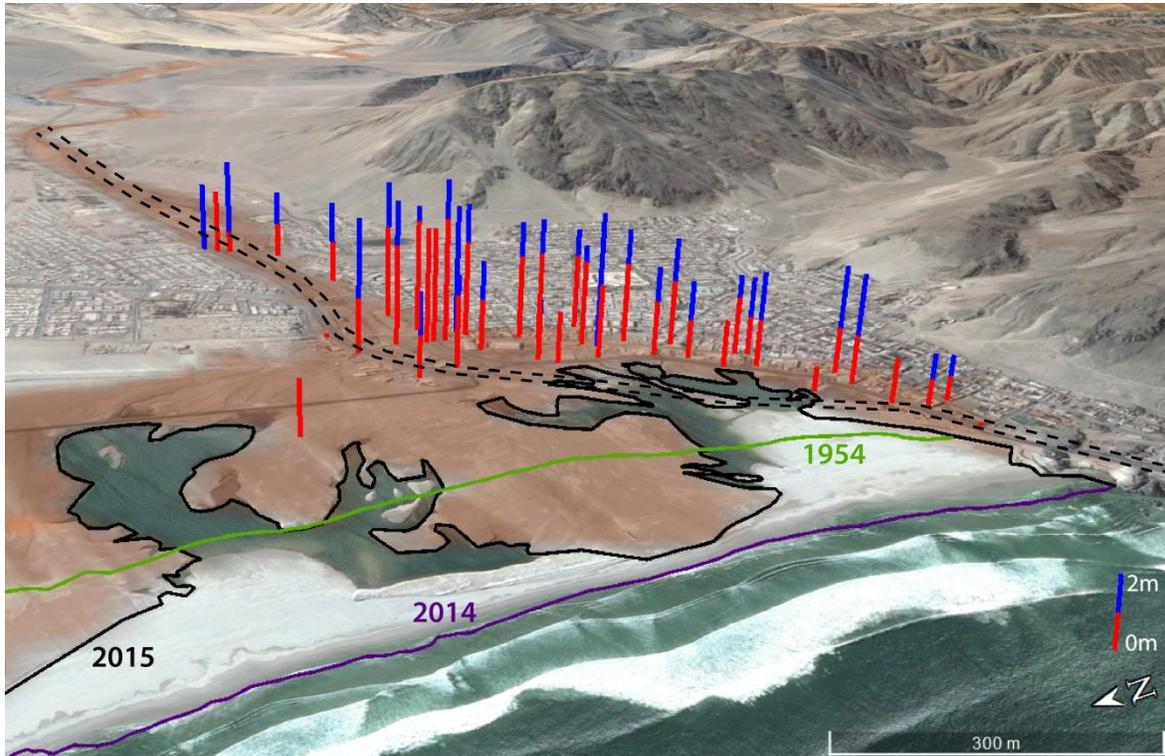


Figura 14: Imagen satelital de Google Earth 2015 modificada mostrando en barras los 60 datos obtenidos en terreno. La parte roja representa los niveles de depósito, mientras que la parte azul la inundación. Las líneas punteadas representan la carretera ruta 5 norte. En tonos anaranjados se observa el área de inundación del aluvión. En el lado Oesteeste, en morado se demarca la línea de costa pre-aluvión. Las alturas han sido exageradas para ayudar a su interpretación.

Se realizaron perfiles O-E de inundación y depósito a lo largo de la ciudad de Chañaral usando la información de inundación y espesor de los depósitos, partiendo desde la parte más sur de la inundación hasta llegar al río El Salado para poder interpretar de mejor forma este evento. La ubicación de los perfiles E-O se encuentra trazada en la Figura 15.

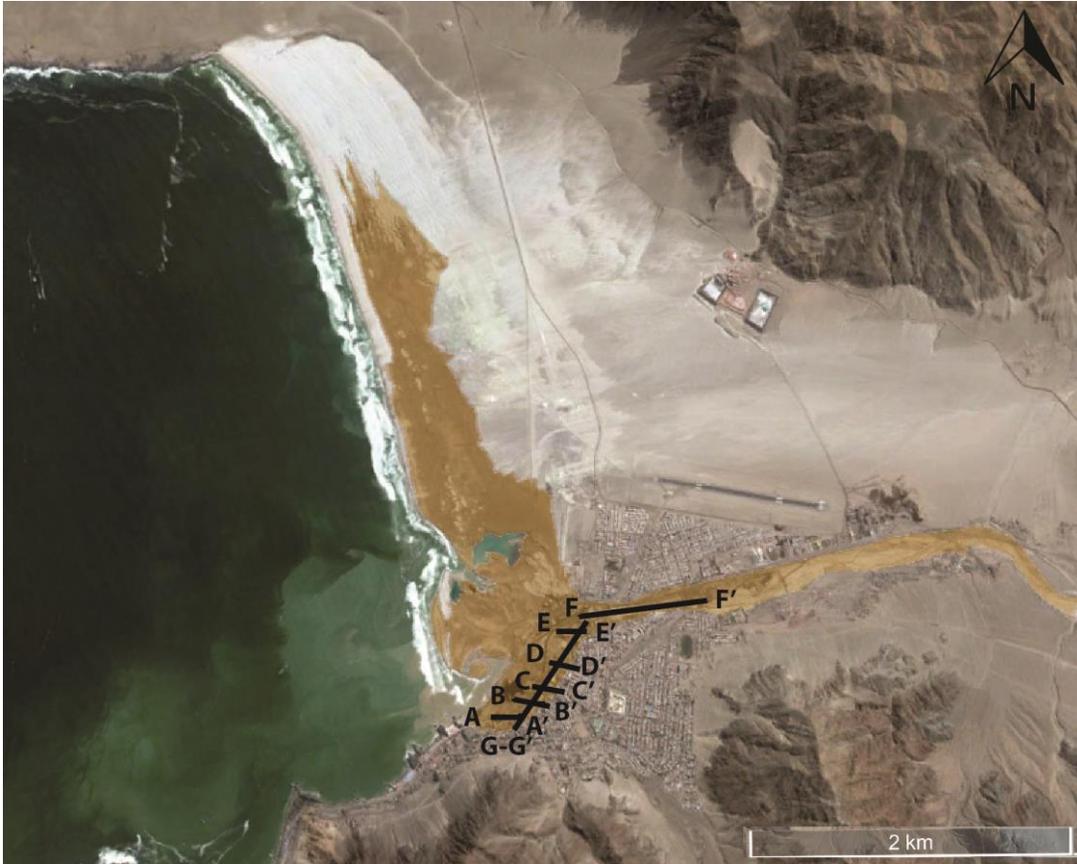


Figura 15: Chañaral en una imagen satelital de Google Earth año 2015 modificada. En tonos anaranjados se representa la zona de inundación del aluvión. Las líneas negras representan la ubicación de los perfiles de la Figura 16.

Se puede observar en los gráficos representados en la Figura 16 la representación de los niveles de inundación, al igual como el nivel de depósitos generados por el aluvión dentro de la ciudad, que es donde se pudo recopilar este tipo de observaciones, todo esto usando como nivel base topográfico la modelación del relieve de la zona generada en Surfer.

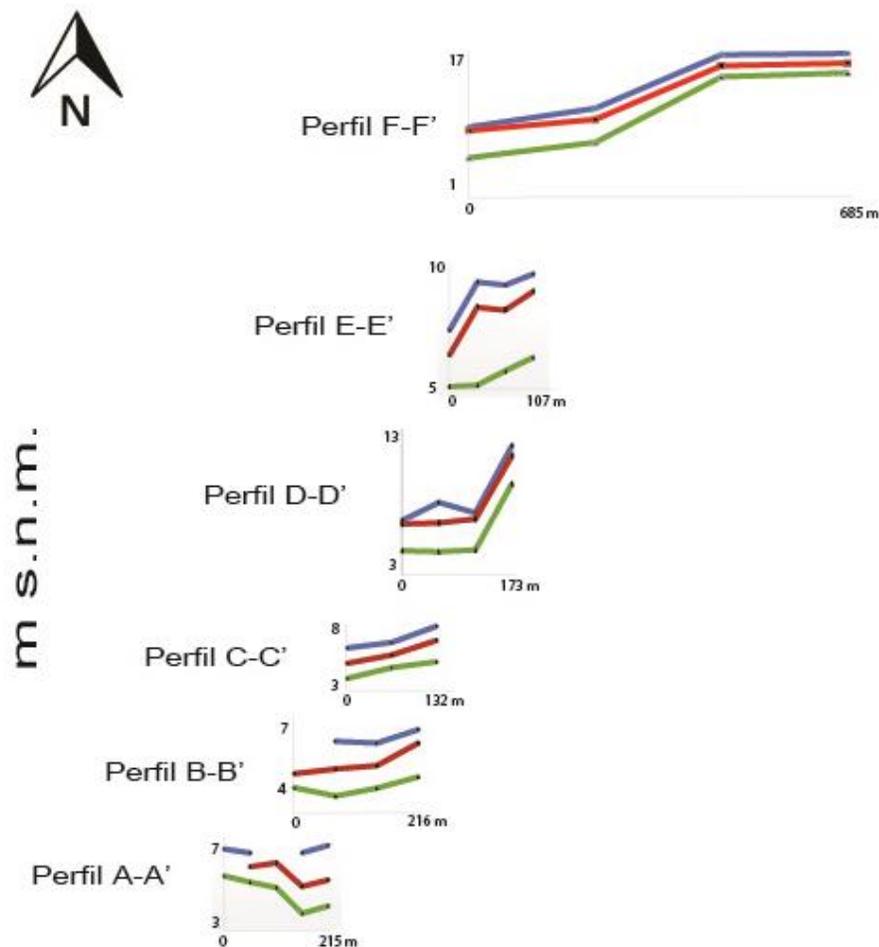


Figura 16: Perfiles O-E de la inundación(azul), depósitos(rojo) y topografía(verde), mostrados en planta según su ubicación y a escala. La ubicación exacta de los perfiles se encuentra en la Figura 15.

Los perfiles O-E parten desde el sur, en la parte terminal de la inundación (perfil A-A') avanzando hacia la parte central del río (perfil F-F'). El perfil F-F' de la imagen IG, muestra como la potencia de los depósitos, al igual que la altura de inundación, aumenta con respecto a la topografía al llegar a la ciudad. En la parte central (perfiles B-B', C-C', D-D', E-E') la inundación y los depósitos fueron en gran parte homogénea entre ellos, siendo en el perfil E-E' donde se observaron las mayores diferencias con respecto al suelo. También se observa que el espesor de estos parámetros disminuye hacia el sur, o sea alejándose del curso del río. Las líneas verdes, representan la topografía. En los perfiles B, C, D, E y F de la Figura 16 se puede observar la existencia de una terraza en el sector sur de la desembocadura del río.

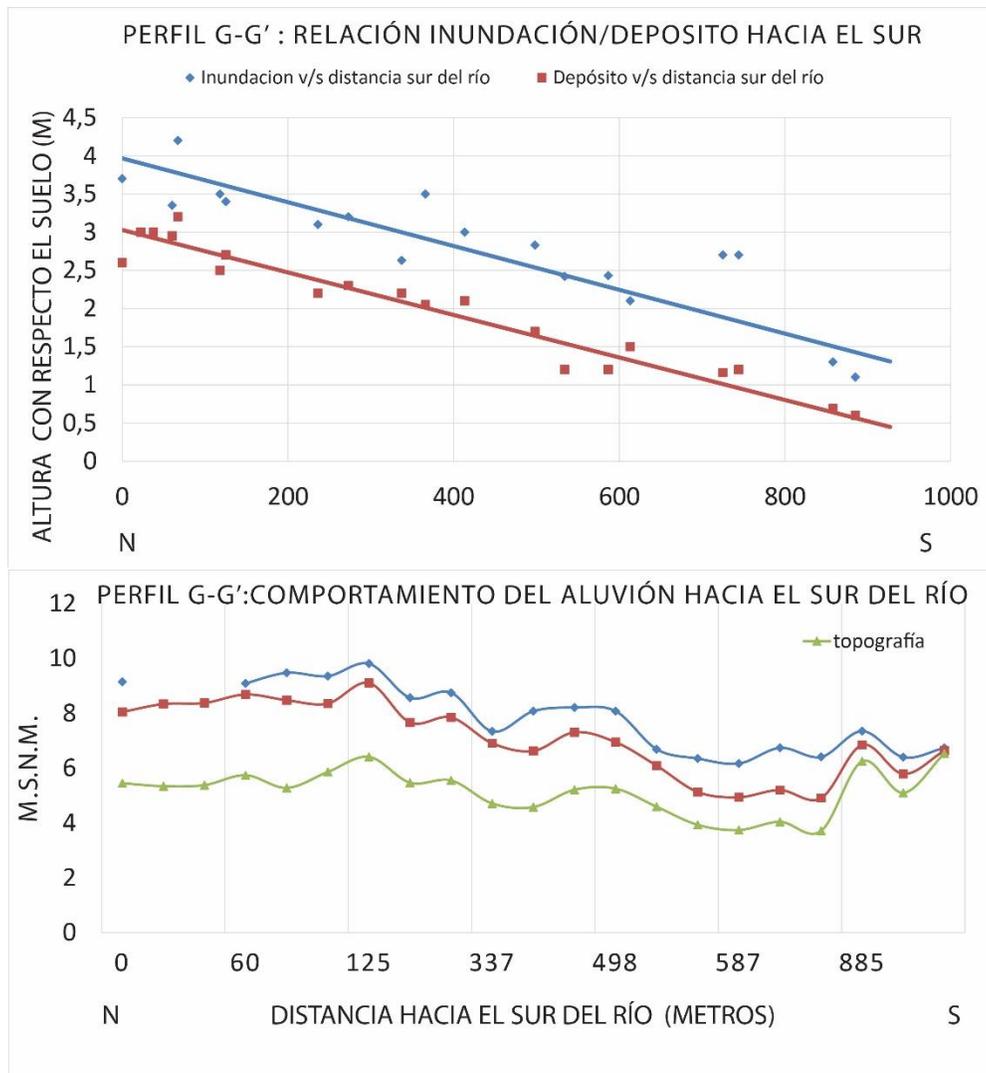


Figura 17: Gráfico de altura versus distancia, que muestra el cambio de los niveles de inundación y alturas de depósitos desde el río Salado hacia el sur. Se representan las regresiones lineales correspondientes a cada uno.

Por otro lado, también se realizó un gráfico que muestra la altura de la inundación y de los depósitos desde el eje del río Salado hacia el sur, es decir, la parte baja de la ciudad como se observa en la Figura 17, la cual refleja un comportamiento lineal de la altura de inundación y de los depósitos mientras aumenta la distancia al eje del río, con una tasa de disminución estimada, a partir de la regresión lineal de 0,028 m/m. Las pequeñas desviaciones respecto de esta tendencia son esperables dadas la irregularidad del flujo, de la topografía y por la confluencia de calles.

3.1.2 Mapeo del flujo

El flujo aluvial se mapeó a una escala 1:10.000 basándose en las imágenes satelitales proporcionadas por *Google Earth* y con la información obtenida en

terreno. Por otro lado, en sectores río arriba, se complementó el mapeo con el testimonio de testigos locales de Diego de Almagro, que referenciaron con calles los límites de la inundación.

Al realizar polígonos en los sectores donde recorrió el aluvión, desde el principio de la cuenca hasta su desembocadura, se puede caracterizar un área de inundación la cual se observa en la Tabla 5.

Tabla 5: Áreas de inundación de acuerdo al mapeo realizado en imágenes satelitales de Google. El área ciudad Chañaral se encuentra incluido en el área Chañaral-Salado*

Sector	Área (km ²)
Ciudad Chañaral*	2,75
Chañaral – Salado	11,15
Salado- Vegas de Vicuña	32,00
Área total de inundación	43,15

El flujo aluvial principal recorrió el curso del río Salado, curso más importante de esta hoya hidrográfica. En terreno se observó a lo largo del río la erosión de las laderas de éste, como se muestra en la fotografía de la izquierda de la Figura 18 donde la construcción enmarcada con el zoom se encontraba con sus 4 paredes bajo tierra antes del aluvión, y por otro lado en la imagen derecha de la Figura 18 se observa la erosión de la base del río al ver la diferencia de la línea del tren con el nivel basal del cauce del río.



Figura 18: Fotos que evidencian el efecto erosivo del paso del aluvión por el Río Salado. A la izquierda se observa en Diego de Almagro como cambió el ancho del cauce del río y a la derecha, en la ciudad de Salado, se observa cómo cambia la parte basal del cauce al evidenciarse el socavamiento bajo la línea del tren. (Fotografías facilitadas por Álvaro Rojas, 2015).

El flujo pudo alcanzar grandes dimensiones y no solo arrasó con depósitos naturales, sino que también con un área de los sectores poblados colindantes al río, lo que se suma a los aportes hídricos y de sedimentos, los aportes antrópicos como casas, camiones, autos, parte de la carretera, línea del tren, entre otras.

Se logró visualizar la proveniencia de los distintos aportes que recibió la quebrada Salado para generar el flujo del aluvi6n. La quebrada Chañaral Alto, que se encuentra al sur de la quebrada principal como se puede observar de color naranja en la Figura 19, gener6 un aporte significativo al flujo que posteriormente confluiría a la ciudad de Salado y finalmente Chañaral.



Figura 19: imagen satelital de Google Earth a6o 2015 modificada mostrando la confluencia entre el flujo de la quebrada Chanaral Alto en naranja y el flujo de la quebrada del Rí0 Salado en amarillo.

En la imagen de la Figura 20 se observa en polígonos de borde negro el aporte de escorrentía superficial a el flujo principal en el sector norte y sur de la quebrada del Rí0 Salado, escorrentía la cual confluye en forma de abanicos aluviales marcados en naranja a la quebrada principal del rí0 Salado, muy cercano de la ciudad de Diego de Almagro y rí0 arriba de la ciudad.

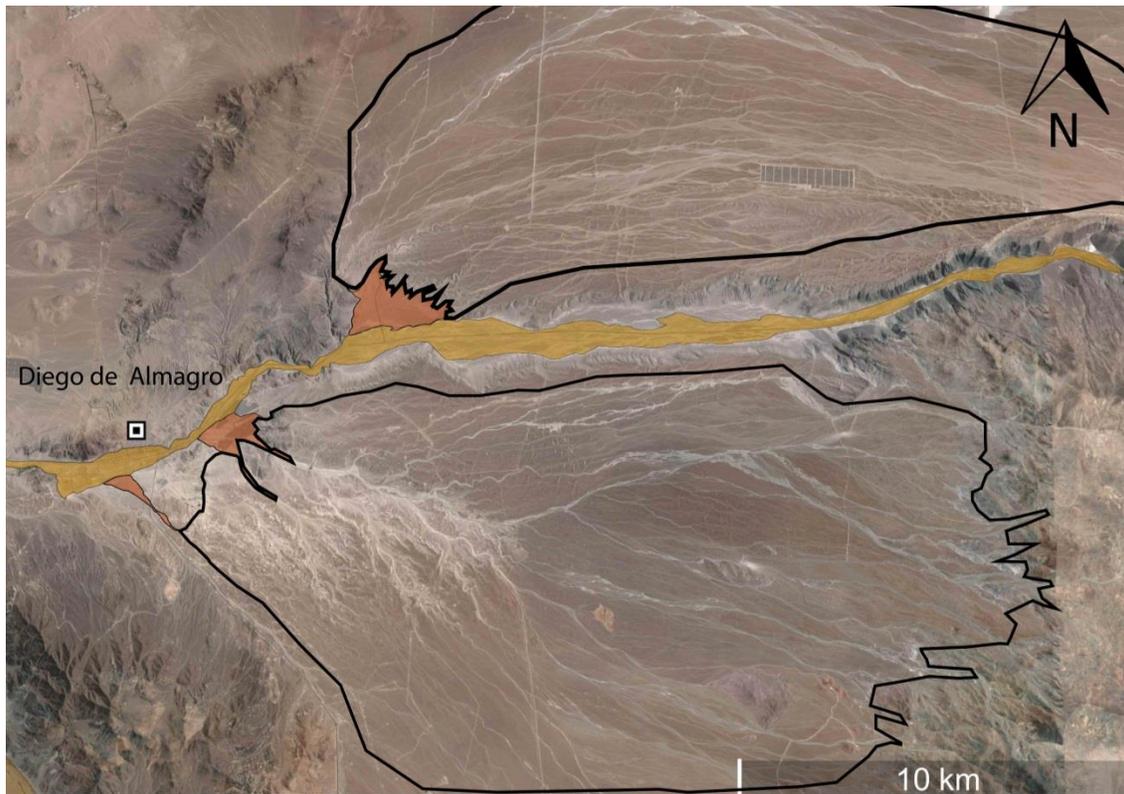


Figura 20: Imagen satelital de Google Earth año 2015 modificada mostrando la escorrentía superficial en polígonos de borde negro y confluyendo a abanicos aluviales en naranja hacia el flujo aluvial en amarillo.

Finalmente, en la parte más este de la quebrada Río Salado se observa un aporte desde el Salar Pedernales generado de forma antrópica, la cual se puede distinguir claramente en las imágenes satelitales que se observa en la imagen de la izquierda de la Figura 21. Con líneas segmentadas se demarca el cambio de coloración del lecho del río, siendo blanquecino hacia el SO del río por el agua proveniente del salar. En la imagen de la derecha se observa la salida de origen antrópico del salar en la ladera este de la quebrada Río Salado, presentando una gran costra de sal, inexistente años atrás según testigos.



Figura 21: A la izquierda, la imagen satelital de Google Earth año 2015 modificada. Las líneas segmentadas muestran donde empieza el cambio de coloración del lecho de la quebrada Rio Salado. A la derecha se observa una fotografía del drenaje hacia el rio Salado.

3.1.2.1 Línea de Costa

La Bahía de Chañaral de las Ánimas ha sufrido distintos cambios a lo largo de su historia. Como se referenció en el contexto histórico de Chañaral, esta bahía recibió aporte de relave por 37 años. Esto generó una modificación de la morfología, producto de un embancamiento del material de relave, generando, por la dirección NNE del viento, dunas transversales en la zona inmediatamente aledaña. La dirección NNE es la con mayor porcentaje a lo largo del año con un 22.7%, siendo este más común en invierno, según la estadística de los últimos 10 años (Windfinder, 2016), como se observa en la Figura 22.

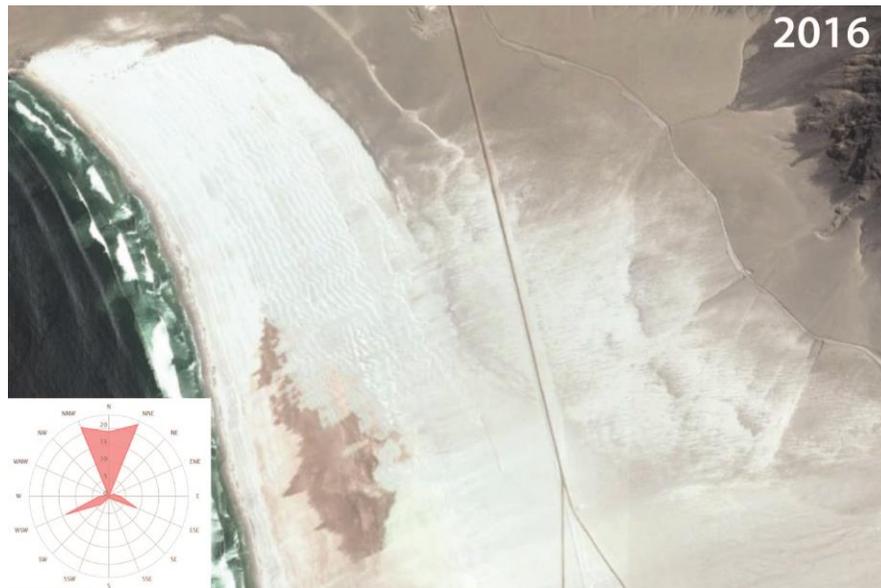


Figura 22: Zoom de la bahía Chañaral de las Ánimas donde se observan dunas transversales de una mezcla de arenas naturales y “arena de relave”.

Las dunas costeras se extienden hacia el sector del piedemonte de la Cordillera de la Costa como se observa en la Figura 22. Esto ocurre en el 77,2 % del año (ya que la dirección de viento es NNW, N, NNE, ENE, E, ESE), mientras que un 12,3% del año, la dirección del viento (E, ESE) favorece un desplazamiento de la arena a la ciudad de Chañaral. La estabilización biológica de estas dunas de arenas ha sido complicado debido al árido clima y la toxicidad de las arenas (Nearyl y Garcia-Chevesich, 2008).

Este embancamiento de relave en la playa de Chañaral modificó la línea de costa original, al igual como lo hizo el paso del aluvión el cual generó grandes socavones como se observa en la Figura 23, los cuales se generaron principalmente en el sector de la desembocadura del Rio Salado.



Figura 23: Fotografía panorámica mirando al oesteeste que muestra los socavones del sector norte de la playa de Chañaral.

Usando fotos aéreas obtenidas por el vuelo Hycon en 1954 con escala de 1:70.000, y se logró obtener una línea de costa representativa a ese año, mientras que usando las imágenes históricas de Google Earth del 2016 se logra obtener la línea de costa pre-aluvión, todo representado en la Figura 24.



Figura 24: Imagen satelital de Google Earth año 2016 modificada donde se observan las distintas líneas de costa extraída de fotos aéreas del vuelo Hycon (1954) y registro histórico de Google Earth.

Se puede observar un cambio significativo en la línea de costa, la cual fue medida en forma cronológica, entregando los resultados representados en la Tabla 6, la cual representa los máximos y mínimos en metros de los cambios de la línea de costa a lo largo del tiempo, al igual que el promedio de estos cambios acompañado de su desviación estándar.

Tabla 6: Datos estadísticos de los cambios en la línea de costa en el tiempo, mostrando su mínimo, máximo, promedio y desviación.

Años	Mínimo(m)	Máximo(m)	Promedio(m)	Desviación (m)
1954-2014	178	384	297,15	58,83
2014-2016	11	718	336,48	244,55

A estas variaciones según los periodos considerados se les pueden atribuir distintas causales. Para el periodo de 1954 a 2014, se atribuye a un factor antrópico y natural ya que corresponden a los últimos 8 años de descarga de relave por el río El Salado seguido por 52 años de procesos naturales erosivos y de equilibrio en el proceso de evolución de una línea de costa. Finalmente, la costa fue afectada por el aluvión del 2015.

3.2 Granulometría, textura y composición de los depósitos.

3.2.1 Granulometría y sedimentología

Al realizar la granulometría y usando los datos estratigráficos obtenidos en terreno se lograron identificar 6 distintas facies que representan a distintas partes del flujo del aluvión. Los resultados del análisis granulométrico se presentan con la distribución de granos en curvas acumulativas, siendo sus ejes el porcentaje peso

y escala Phi. En la imagen de la Figura 25 se observa la ubicación de la clasificación en las distintas facies.



Figura 25: Imagen satelital del SAF del 28 de marzo del 2015 modificada donde se representa la ubicación de las distintas facies definidas.

A partir de las curvas granulométricas acumulativas, se calcularon los siguientes parámetros: media, mediana, selección, asimetría y curtosis. Estos valores fueron calculados de forma visual, a partir de los métodos definidos por Folk (1966), y se presentan en la Tabla 7. Promedio, mediana y selección están medidas en phi (ϕ), mientras que el resto son parámetros adimensionales.

Tabla 7: Información granulométrica de las distintas facies, de acuerdo al método de Folk (1966). (Leptocurto con negritas es muy leptocurto).

Facies	Muestra	Promedio	Mediana	Selección	Asimetría	Curtosis
A	CH1532	-0,426	-1,502	Muy mala	Muy positiva	Mesocurto
	CH1533	2,203	1.716	Muy mala	Positiva	Leptocurto
B	CH1521	-1,545	-1,519	Muy mala	Positiva	Mesocurto
	CH1534	-1,289	-2,223	Muy mala	Muy positiva	Mesocurto
C	CH1514	-0,224	-1,584	Muy mala	Muy positiva	Mesocurto
	CH1515	-3,859	-4,527	Muy mala	Muy positiva	Leptocurto

	CH1518	-1,003	-1,447	Muy mala	Muy positiva	Leptocurto
	CH1519	-3,246	-4,149	Muy mala	Muy positiva	Leptocurto
	CH1524	-2,245	-2,228	Moderada	Simétrica	Platicurto
	CH1525	1,535	1,022	Muy mala	Muy positiva	Leptocurto
	CH1528	-0,192	-1,289	Muy mala	Muy positiva	Leptocurto
	CH1529	-1,581	-2,914	Muy mala	Muy positiva	Mesocurto
	CH1530	0,555	-0,197	Muy mala	Muy positiva	Leptocurto
	CH1531	-0,423	-1,753	Muy mala	Muy positiva	Mesocurto
D	CH1523	-1,149	-2,302	Muy mala	Muy positiva	Leptocurto
E	CH1516	-0,976	-2,126	Muy mala	Muy positiva	Leptocurto
	CH1517	2,952	1,732	Muy mala	Muy positiva	Platicurto
	CH1526	-0,287	-0,359	Muy mala	Positiva	Leptocurto
	CH1527	-2,897	-3,561	Muy mala	Muy positiva	Leptocurto
F	CH1501	2,906	2,042	Muy mala	Muy positiva	Leptocurto
	CH1502	3,654	2,724	Muy mala	Muy positiva	Platicurto

Se realizaron columnas estratigráficas de las distintas facies las cuales tienen una simbología en común representada en la



Figura 26: Simbología de las columnas estratigráficas de las facies a, b, c, d, e y f.

Facies de canal (a)

Esta facies corresponde al flujo en el cauce del río Salado, antes de llegar al sector central de la ciudad, o sea antes de llegar a la carretera Ruta 5 Norte. Presenta una estratificación y laminación. La base visible del depósito, se observa arena de tamaño medio y selección regular; luego un nivel de arena fina a limo con laminación paralela, con clastos de tamaño grava a bloque. Arriba, se tiene un nivel de arena media a fina algunos con clastos de tamaño grava, para luego terminar una delgada capa de barro arcilloso.

Las muestras que representan esta facies corresponden a la CH1532 y CH1533. En la Figura 27 se observa su curva granulométrica acumulada.

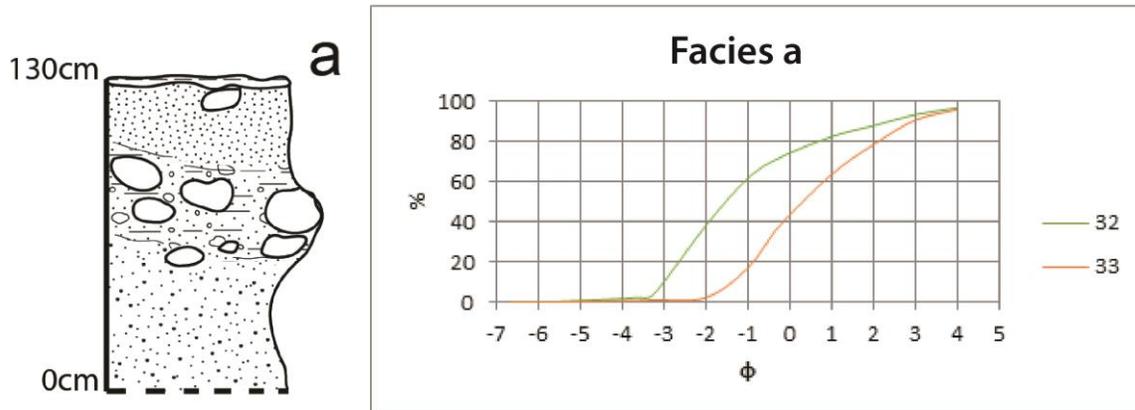


Figura 27: curva granulométrica acumulada facies a y su correspondiente columna estratigráfica.

La muestra 32 presenta una población marcada y una segunda mucho más pequeña en los sedimentos más finos, en comparación con la muestra 33 donde se observan dos poblaciones de distinto tamaño, una relativamente simétrica de tamaño más grueso y otra población un poco más fina con asimetría positiva. La muestra 32 es en promedio de grano más grueso que la muestra 33 como se observa en la Tabla 7, ambas presentan muy mala selección y con más porcentaje de sedimentos finos.

Facies de desborde norte (b)

La extensión anormal del flujo del aluvión no solo generó desbordes hacia el sur, sino que también abarcó una extensa área en el sector norte, afectando principalmente el área de la playa de la ciudad de Chañaral. Esta área presentó espesores menores a los del sur presentando una secuencia de gravas y gravillas clasto-soportadas que varían hacia el norte, a arena gruesa masiva al igual como varía su disminución de potencia. En la parte norte terminal del depósito aluvial se tienen niveles muy delgados de arena fina y barro arcilloso, mezclándose con la arena de la misma playa.

Las muestras que representan la facies de desborde sur del aluvión corresponden a las CH1521 y CH1534. En la Figura 28 se pueden observar su curva granulométrica acumulada.

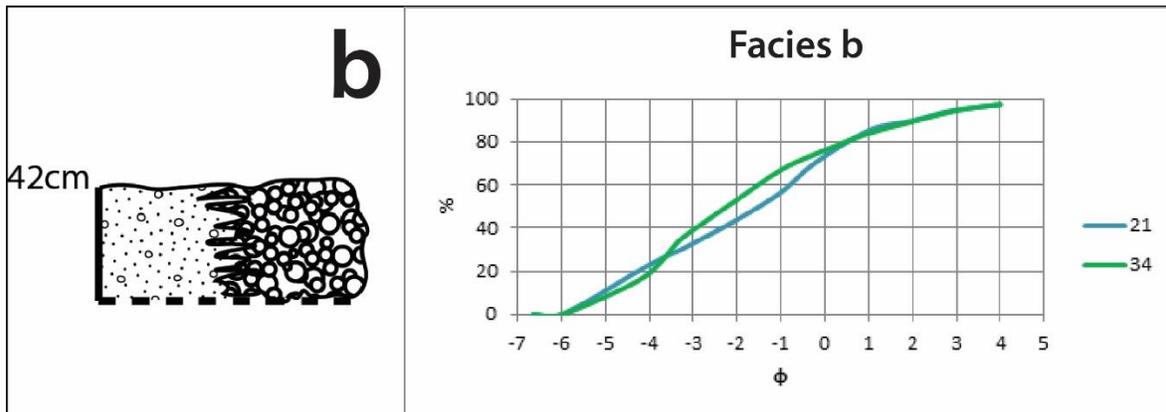


Figura 28: curva granulométrica acumulada y su correspondiente columna estratigráfica de la facies b.

Se observa, en ambas muestras, dos poblaciones muy marcadas y ambas en el rango de grano grueso, pero una población más que la otra; mientras que hay una de menor magnitud en el límite del tamaño arena. En general, son muestras de grano grueso (promedio entre 2 y 3 mm), con muy mala selección y cargada hacia la presencia de finos, como lo indica la Tabla 7.

Facies de desborde proximal sur (c)

Esta facies se asocia al sector sur del curso normal del río Salado, donde las muestras se ubicaban en el centro de la ciudad y próximos a la carretera Ruta 5 Norte, más específicamente en el lado este.

La facies tiene de base una sucesión de gravas y bloques que son matriz-soportados con una matriz de arena fina granodecreciente, que gradúa a un nivel de gravillas clastosoportadas. En el techo presenta, al igual que la facies anterior, una delgada capa de barro arcilloso.

Las muestras que representan esta facies del aluvión corresponden a las 14/15 (que corresponde al mismo depósito diferenciando entre nivel inferior/nivel superior), 18/19, 25/24, 28/29 y 31/30. En la Figura 29 se pueden observar su curva granulométrica acumulada.

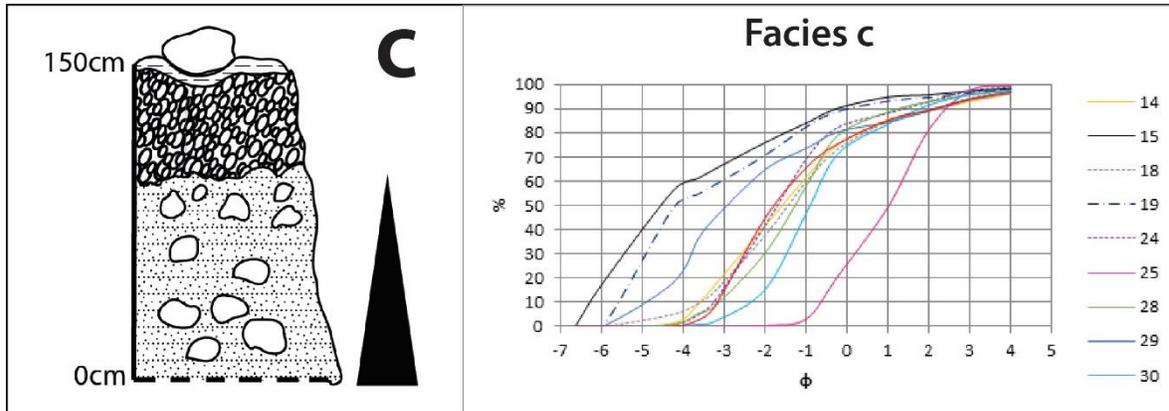


Figura 29: curvas granulométricas acumulada y su correspondiente columna estratigráfica de la facies c.

En general, se observa una población marcada en cada muestra, tanto para las de nivel superior como las de nivel inferior. En general, los niveles superiores presentan un tamaño de grano menor que los niveles inferiores como se observa en la Tabla 7, la mayoría de las muestras tienen muy mala selección y están más cargadas de finos, excepto la muestra 24 que difiere al resto de las muestras.

Facies de desborde terminal sur (d)

Esta subfacies se ubica un levemente más hacia el sur que la facies b y corresponde a un cambio de esta. Existe una repetición de la secuencia de la facies b, bloques y gravas matriz-soportados y gravillas clastosoportadas, la cual se repiten dos veces. Se observa que tiene a ser grandecreciente hacia el techo el cual es, al igual que las anteriores, una capa delgada de barro arcilloso.

Las muestras que representan la facies de desborde sur del aluvión corresponden a la CH1523. En la Figura 30 se pueden observar su curva granulométrica acumulada.

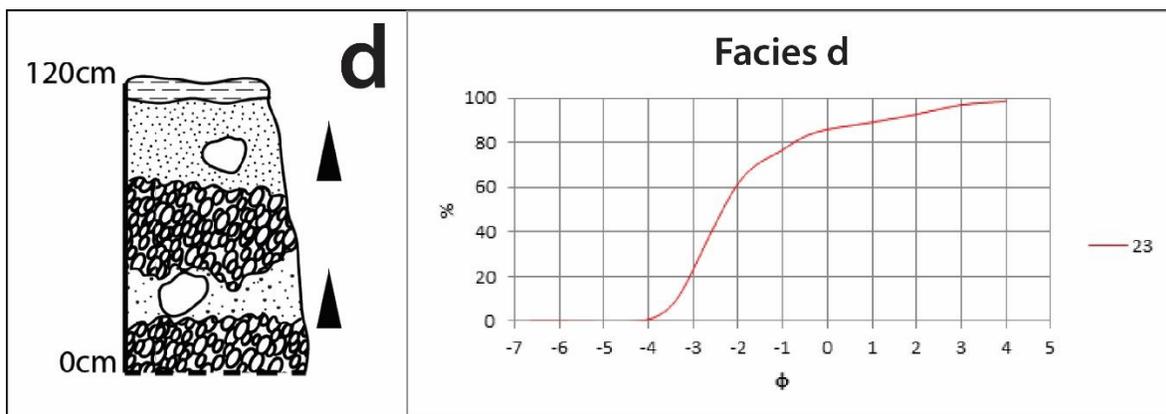


Figura 30: curva granulométrica acumulada de la facies d y su correspondiente columna estratigráfica.

La curva presenta una sola población, de tamaño promedio grueso. La selección es muy mala y en tendencia a ser de tamaño más fino como se observa en la Tabla 7.

Facies de desborde lateral sur (e)

Esta facies corresponde a la expresión lateral del desborde al sur, presente en calles aledañas a las principales por donde se desplazó gran parte del flujo, acercándose al límite de inundación. Corresponde a una secuencia grano-decreciente, con una base de gravas y bloques clasto-soportado, que a medida que van subiendo van disminuyendo de tamaño, y aumentando la cantidad de matriz. Igualmente está cubierta en el techo por una capa delgada de limo.

Las muestras que representan la facies de desborde sur lateral del aluvión corresponden a las 16/17 y 27/26 (la muestra 17 y 26 corresponde a niveles superiores de un depósito, siendo las muestras restantes sus correspondientes niveles inferiores). En la Figura 31 se pueden observar su curva granulométrica acumulada.

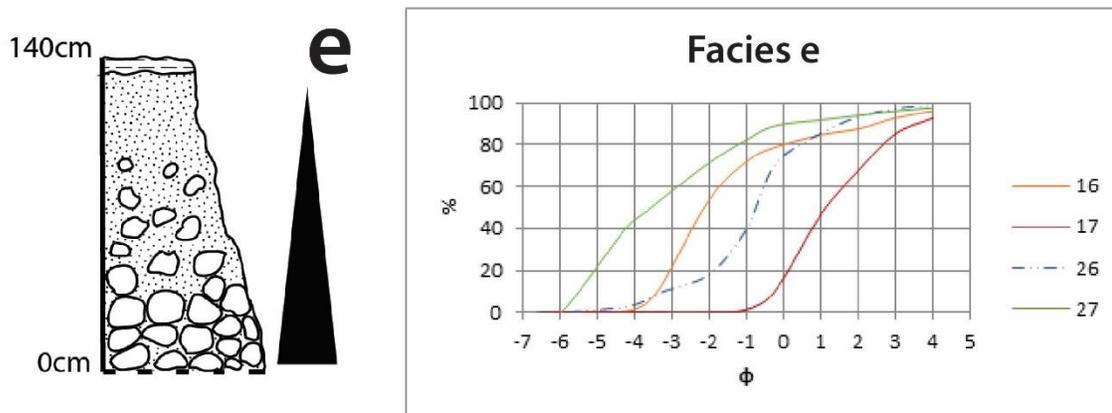


Figura 31 : curva granulométrica acumulada facies e y su correspondiente columna estratigráfica.

Las muestras 26/27 muestran dos poblaciones, la primera de grano más grueso que la segunda. Mientras las muestras 16/17 presentan una sola población. Las muestras poseen muy mala selección y cargada a la presencia de finos como se observa en la Tabla 7.

Facies de terminal desborde sur (f)

Esta facies corresponde cercana al límite de inundación que se desbordo al sur, en la parte más final, y por ende de menor potencia. Desde la base se tiene una capa de arena fina a muy fina, que luego varía abruptamente a una laminación de limo y arcilla hasta el techo. No se observa la capa de barro en el techo.

Las muestras de la facies de desborde sur terminal del aluvión corresponden a las 1/2. En la Figura 32 se puede observar la curva granulométrica acumulada.

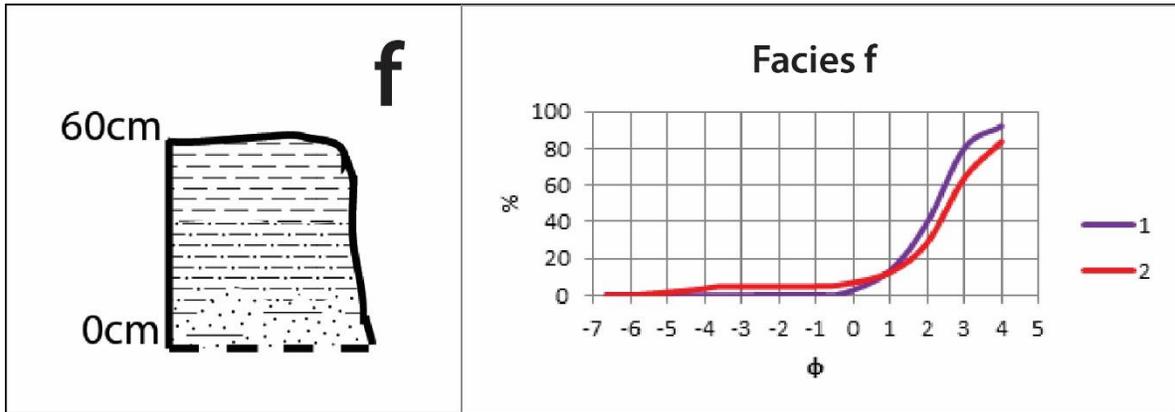


Figura 32: : curva granulométrica acumulada facies f y su correspondiente columna estratigráfica.

Ambas muestras presentan dos poblaciones, una más marcada que la otra, siendo esta la más fina. Las dos muestras son de tamaño de grano arena a finos, donde la muestra 2 presenta una mayor cantidad de finos que la muestra 1. La selección es muy mala y una tendencia a tener más sedimentos finos como se observa en la Tabla 7.

Las alturas de las distintas facies se pueden comparar mejor al observar la Figura 33 donde la facie b, la más alejada de la desembocadura alcanza menores espesores al compararla con la facie que se encuentra directamente en la desembocadura y en la intersección del río con la carretera Ruta 5 Norte.

Correlación Facies y Alturas de Inundación

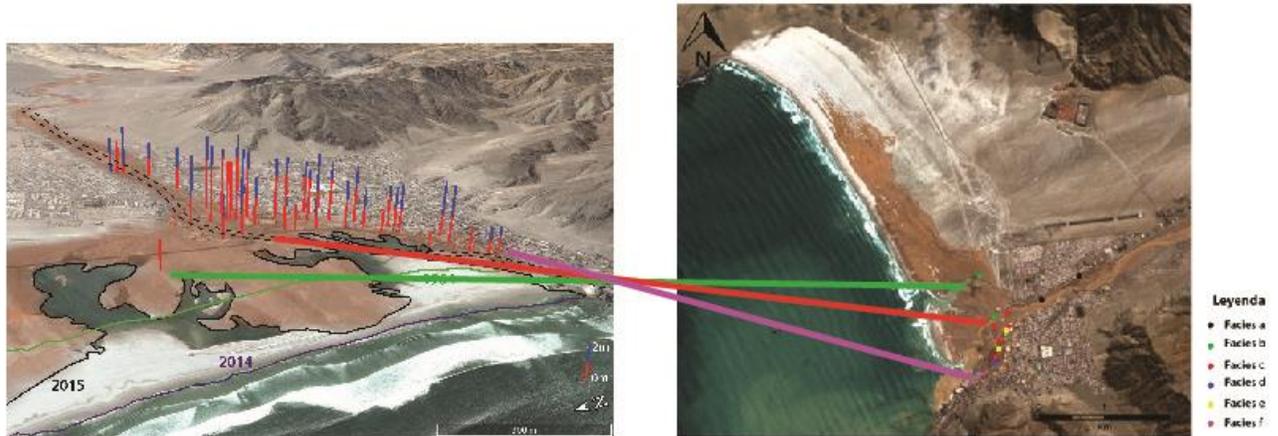


Figura 33: Correlación alturas de inundación con la ubicación de las Facie. Imágenes satelitales extraídas de Google Earth.

3.2.2 Clasificación del flujo

En general los aluviones se presentan de distintas formas, ligado por las distintas características dinámicas en el transporte del material del flujo. Estos flujos se definen como una mezcla de agua y sedimentos de alta densidad, que según sus proporciones reciben distintos nombres. Se habla de *flujos de detrito* a los flujos no cohesivos y *flujos de lodo* a los cohesivos, (Collinson, en *Sedimentary Environments Processes, Facies and Stratigraphy*, 1996) donde los *flujo de lodo* presentan una matriz de grano fino que va aumentando la viscosidad del flujo e inhibe el asentamiento de partículas, correspondiendo a un flujo transicional entre los *flujo de detritos* no cohesivos y los *flujos hiperconcentrados* o muy diluidos (Collinson, 1996). Las facies de depósitos de un aluvión dependen de su posición en la cuenca, siendo en Chañaral la facies terminal de este, donde el flujo llega a la desembocadura del río Salado al mar.

Como se mencionó en la división de facies granulométricas, existen 2 zonas en el aluvión de Chañaral: el desborde al sur, menos extenso, pero de mayor altura de inundación y depósito y el desborde al norte, más extenso pero de espesores bastante menores. También se tomó en consideración una facies que corresponde a la entrada de la ciudad, previo a los desbordes.

Se graficaron el tamaño promedio de las muestras para ver su tendencia en las distintas partes del flujo y así visualizar mejor la dinámica del flujo, representado en la Figura 34 y la Figura 35.

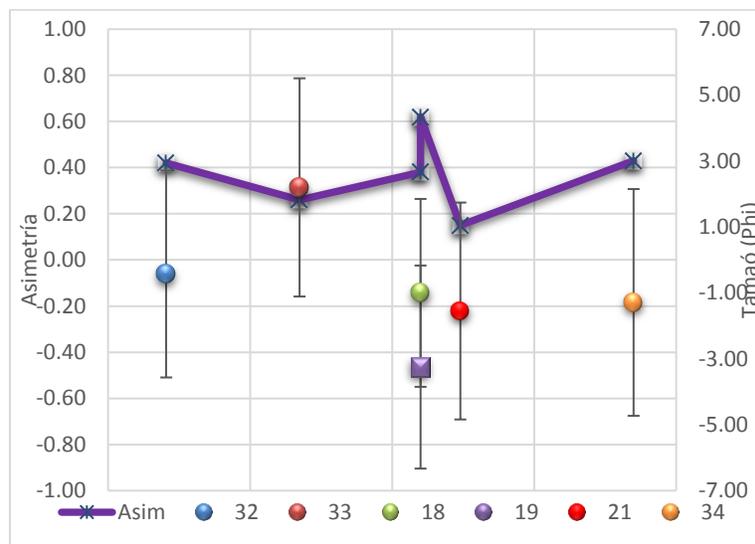


Figura 34: Gráfico que ilustra el cambio en la granulometría del flujo aluvional de este a oesteeste (izquierda a derecha). Los puntos indican el promedio de la muestra representada (triángulo indica una muestra superior del depósito, la curva morada con asteriscos corresponde a la asimetría).

En la Figura 34, las dos primeras muestras, ubicadas de este a oesteeste, correspondientes a la *facies a* (muestras 32 y 33 ubicadas en el cauce del río

Salado, alejada del desborde) tienen una tendencia a disminuir el tamaño de grano a medida que avanza. El desborde sur correspondiente a la *facies b* (muestras 18 y 19), indica un cambio en la facies con peor selección en un principio y dos niveles claramente marcados dentro del mismo depósito. Hacia el noroeste se tienen las muestras correspondientes al desborde norte, *facies c* (muestras 21 y 34), en las que el tamaño de grano es mayor que las ubicadas en el cauce, manteniéndose una selección similar a la anterior. De la asimetría se puede inferir que en general se tiene una mayor carga de finos, donde gran parte de estos finos se dirigen al desborde al sur como se puede observar en el máximo en las muestras 18/19.

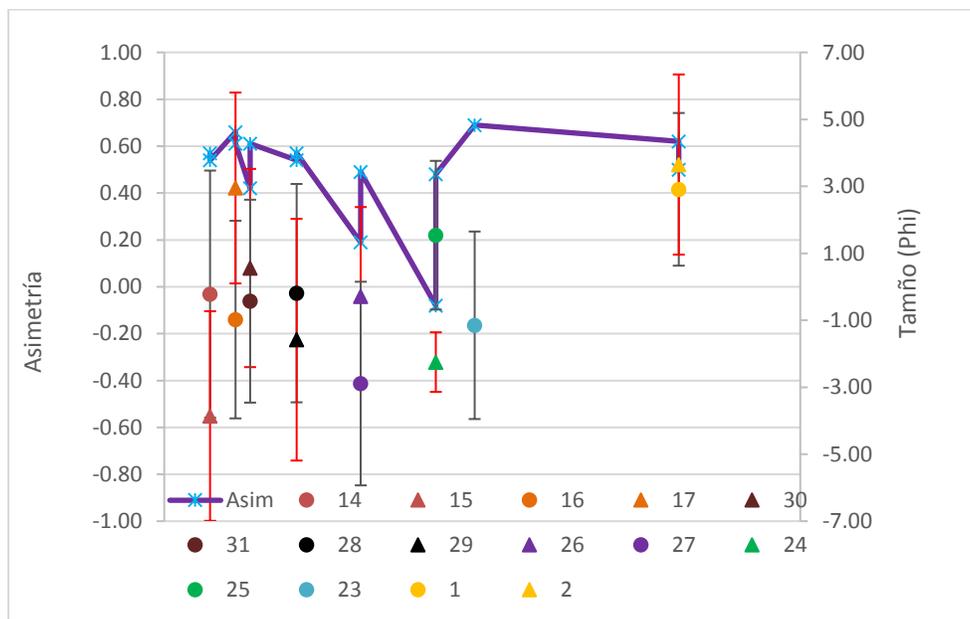


Figura 35: Gráfico que ilustra el cambio en la granulometría del flujo aluvional de las facies a y b, de este a oeste (de izquierda a derecha). Los puntos indican el promedio de la muestra representada (triángulo indica una muestra superior del depósito), la curva morada con asteriscos corresponde a la asimetría.

En la Figura 35 se muestra que el transporte de los sedimentos en el sector del desborde sur presenta una tendencia a ir disminuyendo el tamaño de grano de norte a sur, donde la selección también disminuye relativamente. La asimetría, exceptuando en algunas ocasiones, va cargada hacia los finos, siendo gran parte del agua cargada de sedimentos desbordada hacia el sur.

Según la literatura, usando datos granulométricos se puede detallar los tipos de transporte dentro de distintos flujos. Cuando existe carga en suspensión tamaño menor a 1 milímetro, corresponde a un flujo turbulento (de arena muy fina). Para mayores tamaños de sedimento, la suspensión grada a saltación. Cuando se tiene un transporte por saltación, no hay mucha información acerca del tamaño máximo

de partícula que se puede transportar de esta forma, más allá de datos experimentales. El límite entre saltación y tracción indica algún cambio del flujo, y se relaciona directamente con la energía de éste (Visher, 1969).

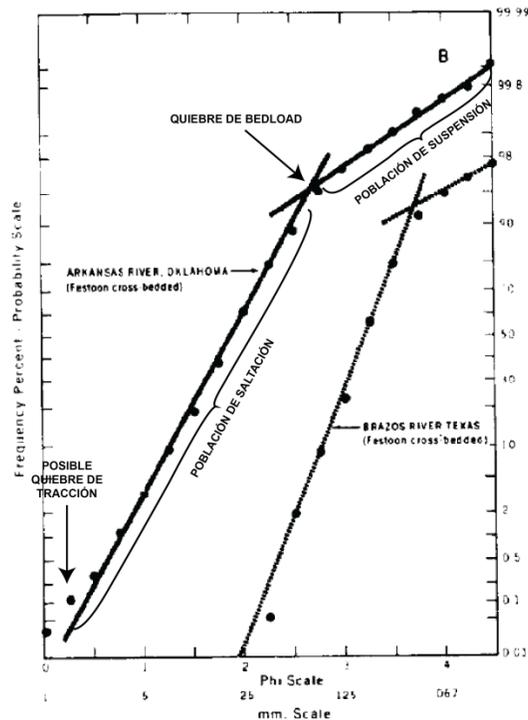


Figura 36: Esta curva ilustra la variación en los puntos de truncamiento y pendientes de poblaciones individuales, entre distintos ríos.. Modificada de Visher (1969).

Vischer también habla sobre determinar la mecánica del transporte de sedimentos de distinto tamaño discriminando las poblaciones dentro de la curva granulométrica acumulativa en escala probabilística. Los puntos de truncamiento de las curvas indican cambios en la dinámica de transporte del flujo, donde en general se tiene en el rango del grano grueso la tracción, en el rango de grueso a medio o fino, saltación, y el resto del rango de los finos, suspensión como se observa en la Figura 36

La población de suspensión en una curva de las recién mencionadas refleja condiciones sobre la interface depositacional, donde una gran población indica una alta concentración de sedimento suspendido en el fluido y también una rápida sedimentación. Si el flujo es muy turbulento, es probable que exista una mezcla entre la población de suspensión y saltación. La población de saltación define el límite entre el nivel superior de suspensión y la carga de lecho (*bedload*) y si el flujo es turbulento, el truncamiento superior tiende a ser a un grano más grueso. Finalmente, la tracción está controlada por la proveniencia, es decir, la disponibilidad de sedimentos de tamaños mayores en el flujo, y ausencia total de granos más finos.

Para determinar su dinámica de transporte y ver si corresponde a un flujo de lodo se analizaran las curvas granulométricas acumulativas de las facies definidas anteriormente

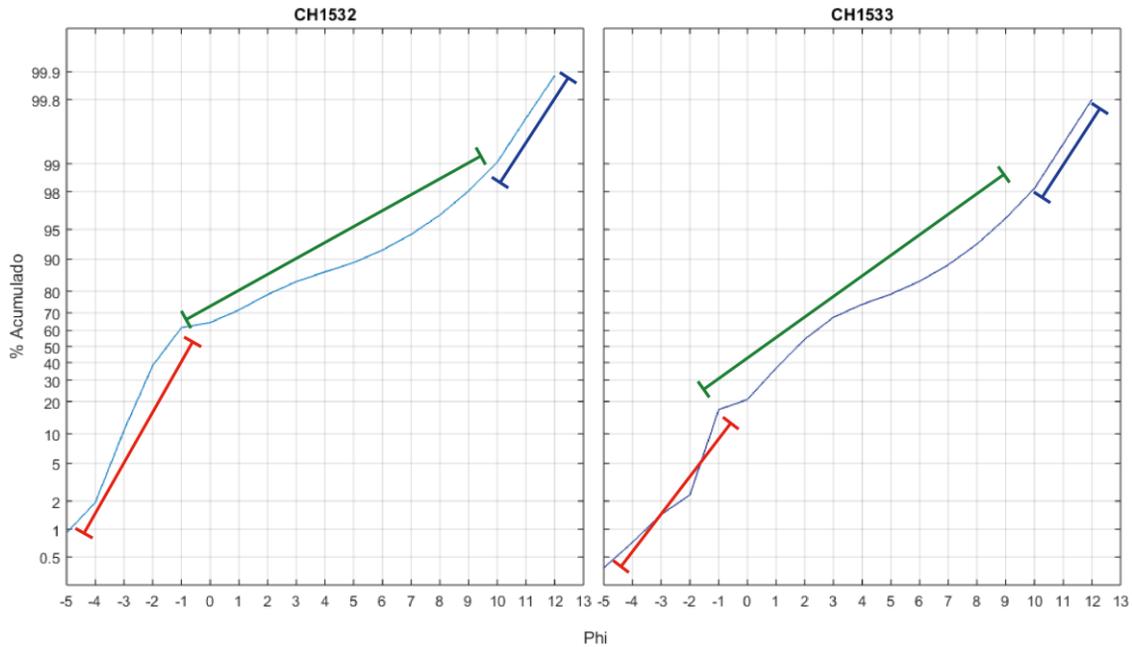


Figura 37: Curvas granulométricas acumulativas en escala probabilística de las muestras de la facies a. Línea roja indica población de tracción, verde de saltación y azul de suspensión.

Para la *facies a* como se observa en la Figura 37 se distingue el truncamiento entre tracción y saltación para el valor de -1ϕ . Su porcentaje es coherente con el nivel de gravas y bloques presente en la *facies a*. La población de saltación va de -1ϕ a 9ϕ aproximadamente, y concentra gran parte de los sedimentos de la *facies*. Se tiene en menor porcentaje una población de suspensión para las arcillas, sin embargo, es importante destacar que el truncamiento entre saltación y suspensión no es marcado, lo que indica lo turbulento del flujo, característico de la *facies* de transporte por el cauce del río Salado.

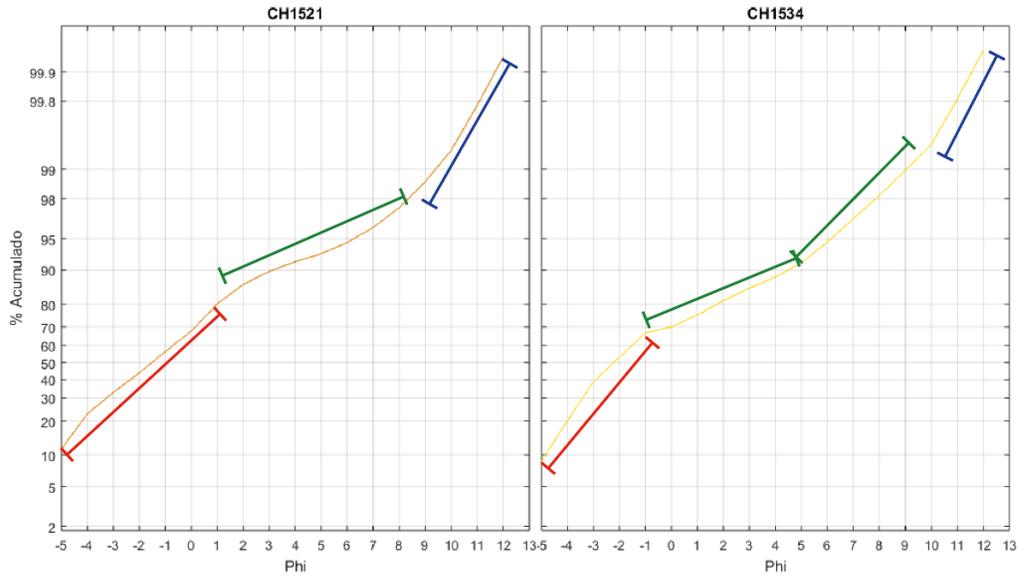


Figura 38 : Curvas granulométricas acumulativas en escala probabilística de las muestras de la facies b. Línea roja indica población de tracción, verde de saltación y azul de suspensión.

La facies b como se observa en la Figura 38 se caracteriza por un repentino cambio lateral de sedimentos gruesos a finos, que se trató de reflejar en la toma de muestras. La carga de tracción presenta su truncación entre los tamaños -1ϕ y 0ϕ , y en general un porcentaje menor que las facies anteriores. La población de saltación se ve más limitada, llegando a tamaños de 8ϕ , un tamaño relativamente mayor a arcilla. Finalmente, la suspensión presenta una pendiente más pronunciada, y su truncamiento se muestra relativamente más marcado, indicando un flujo menos turbulento y de menor energía que el desborde sur. Se evidencia esta disminución de energía al norte, ya que la carga de tracción se limita a muy poca distancia del punto de desborde, pasando a depositar sedimentos más finos al norte, por la playa, de forma casi inmediata; indicando la poca competencia del flujo en esta dirección, para arrastrar clastos mayores.

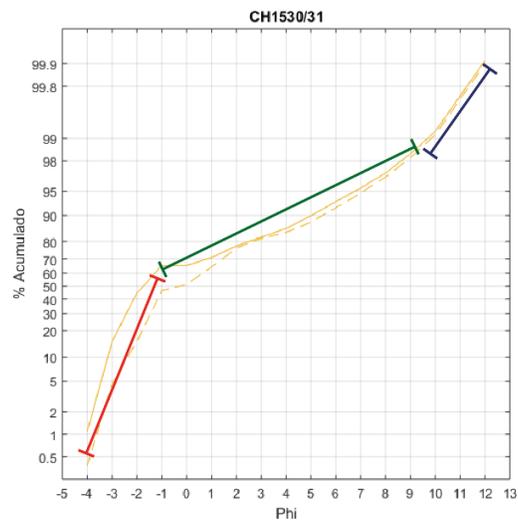
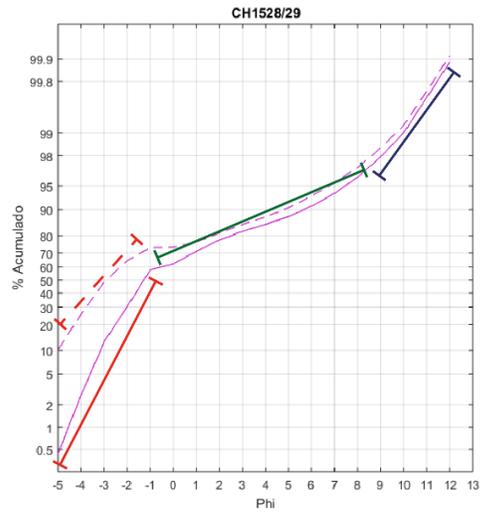
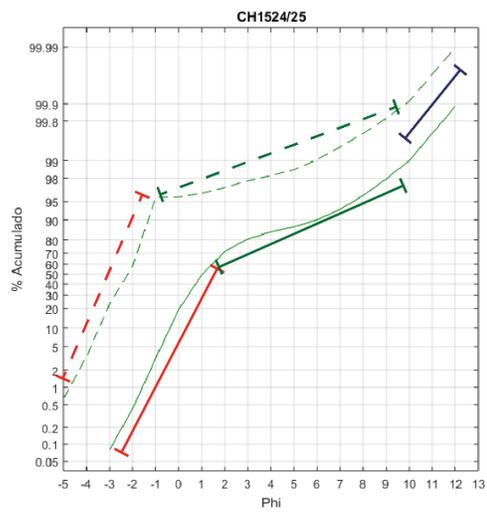
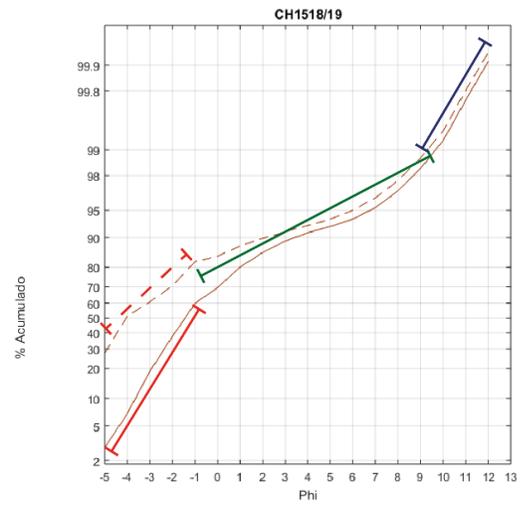
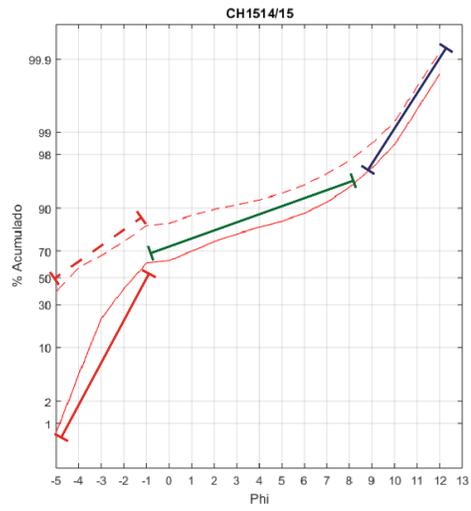


Figura 39 Curvas granulométricas acumulativas en escala probabilística de las muestras de la facies c. Línea roja indica población de tracción, verde de saltación y azul de suspensión.

En la *facies c* se tienen dos muestras por depósito, la del nivel superior clastosoportado (línea punteada) y la del nivel inferior matriz soportado (línea continua) como se observa en la Figura 39. La tracción se delimita tanto para niveles superiores como inferiores para el tamaño entre -1ϕ y -2ϕ en general, salvo para algunas muestras donde el límite es de menor tamaño. Los niveles superiores presentan una carga de tracción mayor que los inferiores, considerando que si bien el nivel inferior posee clastos de gran tamaño, están inmersos en una mayor cantidad de matriz fina que el nivel superior, de tamaños mayores y con menor matriz. La población de saltación, salvo excepciones, presenta tendencias similares tanto para el nivel superior como para el inferior, limitada entre -1ϕ y 9.5ϕ aproximadamente, pero representa un porcentaje menor de la muestra, al igual que la suspensión, donde la truncación es sutil, evidenciando la turbulencia del flujo al igual que la facies a.

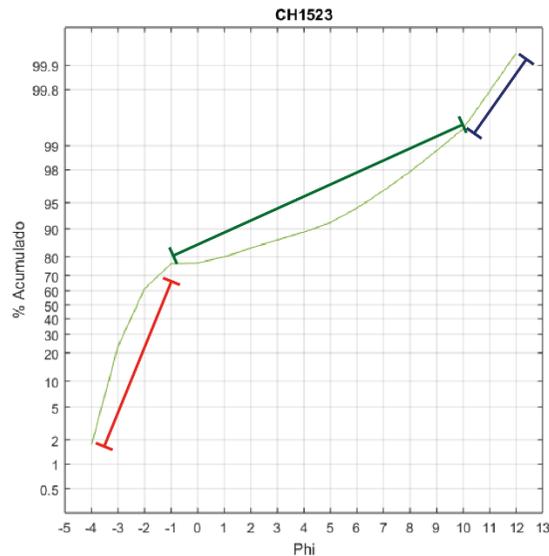


Figura 40: Curva granulométrica acumulativa en escala probabilística de la muestra de la facies d. Línea roja indica población de tracción, verde de saltación y azul de suspensión.

Para la *facies d*, se tiene una dinámica similar como se observa en la Figura 40, pero con una carga de tracción de clastos de menor tamaño, debido a que corresponde a una etapa más avanzada y de menor energía. Nuevamente, la turbulencia que se observa en las figuras va de acuerdo a lo observado en los depósitos. A partir de esta información, se puede determinar que esta facies trae consigo una gran cantidad de sedimentos de gran tamaño, indicando que no hubo mayor disminución de energía entre el transporte por el cauce y el desborde al sur, pese a suavizarse la pendiente al estar en la desembocadura de la cuenca.

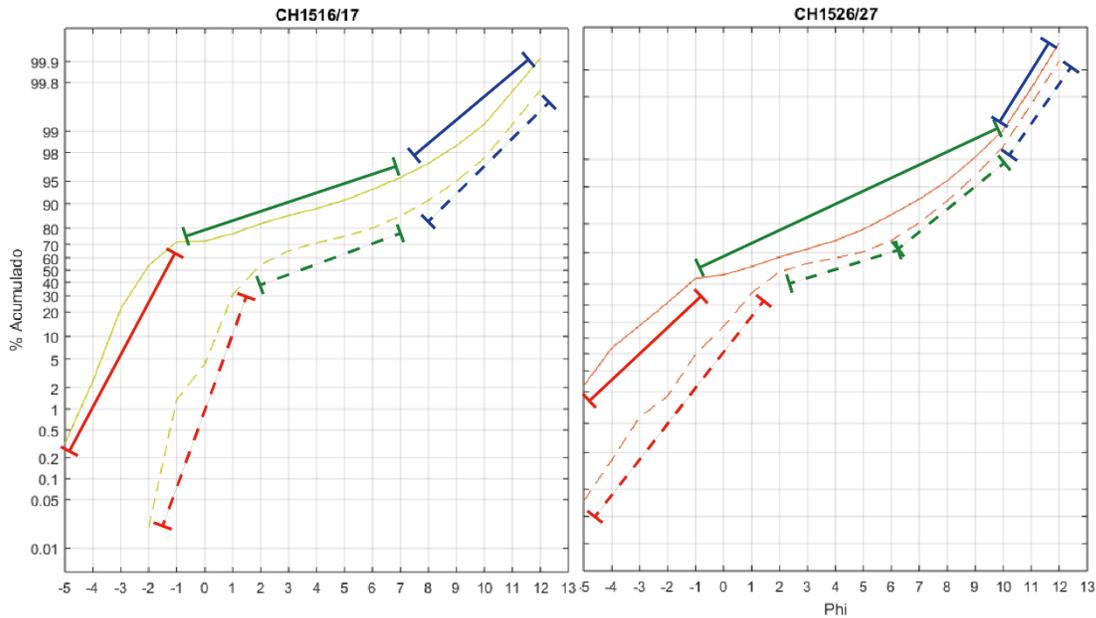


Figura 41: Curvas granulométricas acumulativas en escala probabilística de las muestras de la facies e. Línea roja indica población de tracción, verde de saltación y azul de suspensión.

La facies e se compone de una gradación de bloques a arena fina, sin mayores estructuras sedimentarias muy visibles. Nuevamente para esta facies se extrajeron dos muestras: de nivel superior (arenas, línea punteada) y de nivel inferior (gravas, línea continua) como se observa en la Figura 41. La población de tracción para el nivel superior presenta una alta pendiente y un porcentaje menor, limitada entre -2ϕ y 1ϕ , mientras que en el nivel inferior la carga de tracción es más importante, con tamaños de -5ϕ a -1ϕ . La saltación en ambos niveles presenta un carácter similar, limitándose al tamaño inferior de 7ϕ y se presenta una importante carga de suspensión en ellos, donde el truncamiento entre estas poblaciones ya no es tan gradual como en la facies b. Esto evidencia una disminución en la turbulencia del flujo y una disminución leve en la energía, en comparación con las facies de desborde sur (c y d), probablemente debido a un cambio de orientación en el flujo, ya que corresponde a los depósitos a las calles perpendiculares al transporte norte-sur del aluvión en el desborde sur, lo que pudo haber cambiado la dinámica del flujo de la forma mencionada, en donde el grado de turbulencia sólo permite una gradación simple.

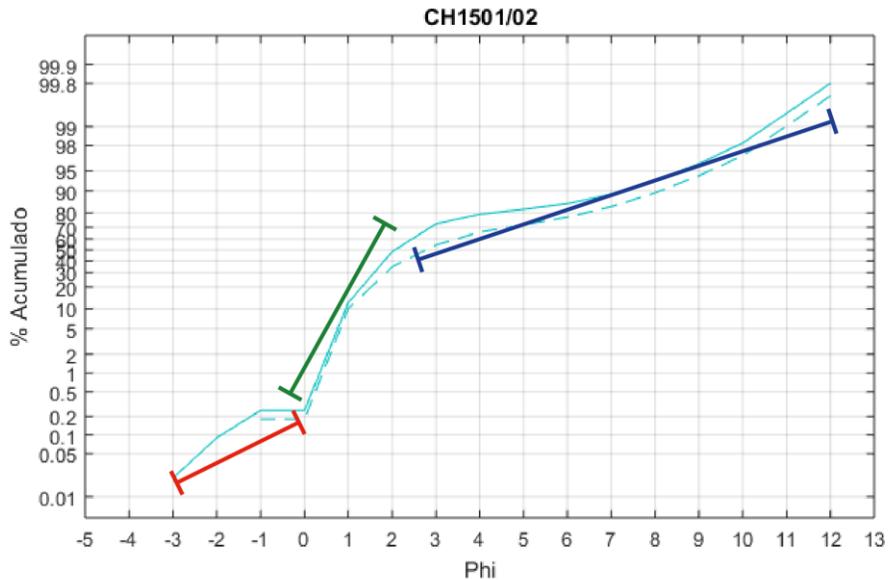


Figura 42 Curvas granulométricas acumulativas en escala probabilística de las muestras de la facies f, en conjunto con su columna tipo. Línea roja indica población de tracción, verde de saltación y azul de suspensión.

La facies de f como se observa en la Figura 42 parte con una muy disminuida carga de tracción, arrastrando algunos pocos sedimentos entre -3ϕ y 0ϕ para ambos niveles. La población de saltación no presenta mucha variación en tamaño de grano, estando entre 0ϕ y 2.5ϕ aproximadamente; dejando la población de suspensión como el transporte predominante en esta facies, transportando sedimentos suspendidos desde arena fina hasta arcilla. El aumento en esta carga de suspensión indica que hay una disminución de energía hacia la facies terminal dejando los clastos gruesos atrás.

Tomando en consideración las observaciones de todas las facies se puede decir que, debido al carácter turbulento del flujo, este aluvión se cataloga como un flujo de barro o *mudflow* en la ciudad de Chañaral, tomando en consideración la gran carga de suspensión que se tuvo en todas las facies. El desborde norte no alcanzó a tener mayor energía, depositando gran parte de sus clastos relativamente cerca de la fuente y extendiéndose por la playa derramándose.

3.2.3 Litología

Los resultados de las descripciones sobre la litología se pueden observar en la Tabla 8 y Tabla 9 correspondiente para distintos tamaños y en los triángulos presentados. Texturalmente su respuesta a la erosión se ve en este caso, dependiente de la composición litológica de los clastos. Se observó que en general el cuarzo y los fragmentos líticos intrusivos se encontraban de subangulosos a sub-redondeados, con una buena esfericidad. El feldespato, en general alterado, con clastos alargados angulosos a subangulosos. Los fragmentos líticos extrusivos y metamórficos se presentaron angulosos a sub-

angulosos, y de forma esférica a elipsoidal; y los fragmentos líticos sedimentarios se observaron sub-redondeados y tabulares.

Tabla 8: Composición de los clastos menores a 2 mm de las muestras del aluvión

Muestra	Cuarzo (%)	Feldespatos (%)	Total Fragmentos Líticos (%)	Líticos Igneo Intrusivo	Líticos Igneo Extrusivo	Líticos sedimentarios	Líticos metamórficos
1	31	23	46	16	0	30	0
14	13	17	70	0	65	0	5
16	27	21	52	5	12	30	5
17	35	25	40	15	10	10	5
18	20	20	60	15	10	25	10
19	22	26	52	16	6	25	5
21	10	20	70	0	64	1	5
22	50	10	40	20	5	10	5
23	10	15	75	0	65	5	5
24	18	29	53	16	12	20	5
25	30	20	50	20	10	15	5
26	35	20	45	5	15	20	5
27	19	22	59	25	9	20	5
29	20	25	55	15	10	25	5
30	30	25	45	15	5	20	5
31	15	25	60	20	10	25	5
32	20	30	50	25	10	10	5
33	25	25	50	15	10	20	5
34	15	20	65	0	50	0	15

Tabla 9: Composición de los clastos mayores a 2 mm de las muestras del aluvión.

Muestra	Cuarzo (%)	Feldespatos (%)	Total Fragmentos Líticos (%)	Líticos Igneo Intrusivo	Líticos Igneo Extrusivo	Líticos sedimentarios	Líticos metamórficos
1	10	15	75	0	75	0	0
14	46	8	46	0	45	1	0
16	40	15	45	5	20	15	5
17	25	30	45	5	25	10	5
19	19	25	56	0	45	1	10
26	35	15	50	5	15	20	10
34	15	40	45	0	25	0	20

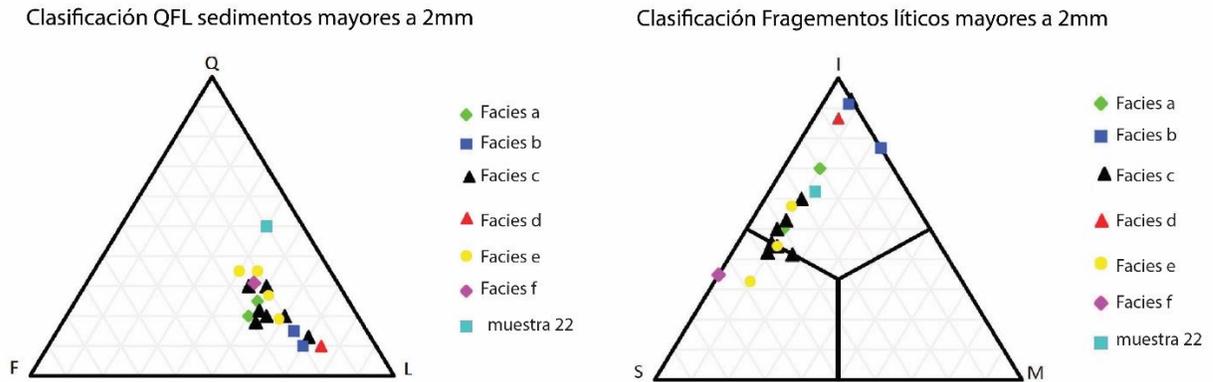


Figura 43 : Triángulos de clasificación de los sedimentos mayores a 2mm . A la izquierda clasificación QFL y a la derecha clasificación de fragmentos líticos.

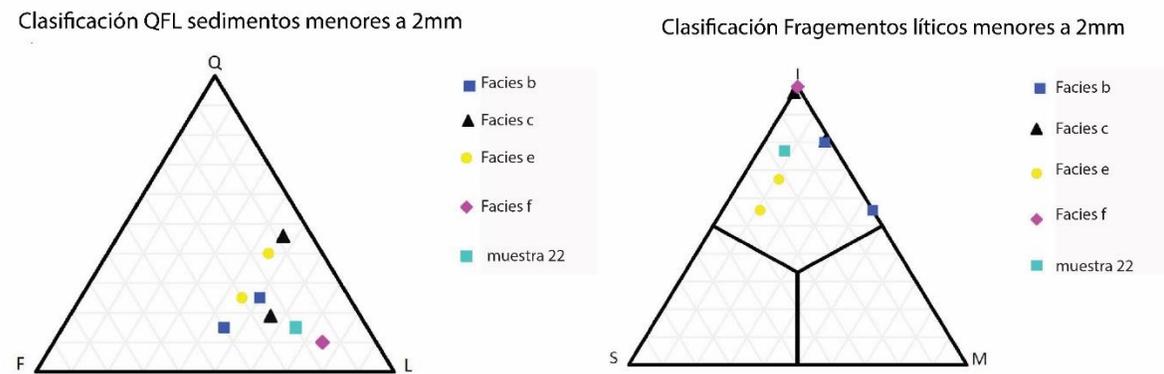


Figura 44 Triángulos de clasificación de los sedimentos menores a 2mm. A la izquierda clasificación QFL y a la derecha clasificación de fragmentos líticos.

Al observar, tanto las Tabla 8 y Tabla 9 y triángulos de Figura 43 y Figura 44 de las dos tamaños de muestra analizado, gran porcentaje equivale a los fragmentos lítico existe una predominancia de fragmentos líticos en las muestras del aluvi3n y no se observa ninguna tendencia especial de composici3n en base a las facies definidas anteriormente. Dentro de los fragmentos líticos observados, hay dominancia de los fragmentos extrusivos correspondientes a lavas alteradas, intrusivos de composici3n granítica, seguido de fragmentos sedimentarios pelíticos o pizarrosos.

3.3 Estimación de Volúmenes

Usando distinta información se estimaron distintos valores para el volumen del aluvión.

3.3.1 Caudal en el tiempo

Usando datos tomados en tiempo real por el SERNAGEOMIN del aluvión de marzo de 2015 se reconstruyeron gráfico caudal en el tiempo para poder calcular una estimación del volumen del aluvión.

El resultado de la representación del caudal en el tiempo se muestra en la Figura 45, gráfico en el cual se observa el comportamiento del caudal, el cual fue aumentando lentamente para luego alcanzar *peaks* en un corto periodo de tiempo, alcanzando un máximo registrado de 2700 m³/s. Se estima el final del aluvión cuando el capitán de puerto de Chañaral da el aviso de la normalización del curso del río.

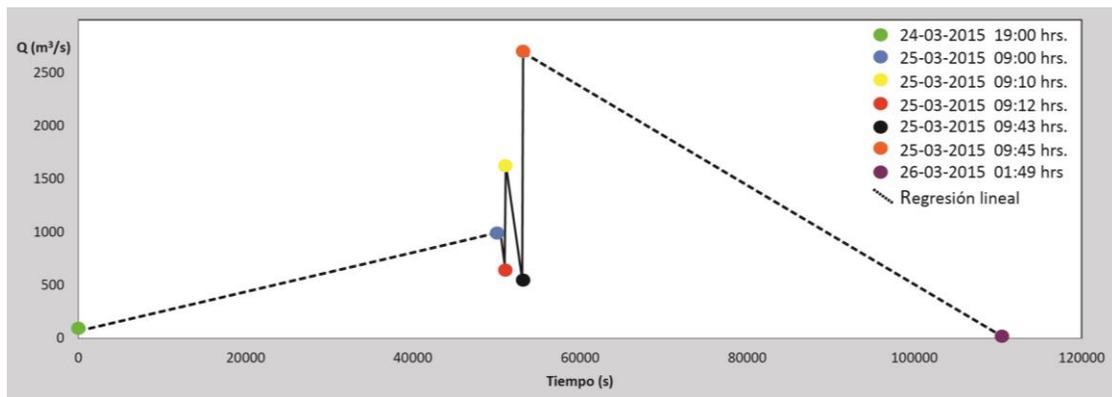


Figura 45: Gráfico caudal versus tiempo con el detalle de los datos en su respectiva hora (Representación de los datos de Naranjo et al., 2015)

Al integrar el área bajo la curva generada con las regresiones lineales de la evolución registrada del caudal en el tiempo (ver ANEXO) se obtuvo un volumen total de 0.113 km³.

3.3.2 Volúmenes con fórmulas empíricas

Distintas relaciones empíricas se han desarrollado para estimar el volumen total de un flujo relacionado con peligros geológicos, teniendo en común el caudal máximo como dato principal. Estas se observan en la tabla en la que se puede ver la información respectiva a cada estimación del volumen por distintos autores.

Tabla 10: Fórmulas empíricas con sus respectivos tipos de flujo, autores y volumen

Formula	Tipo de flujo	Autor	Volumen(km ³)
$Q_p = 0.135V^{0.78}$	Bouldery debris flow	Mizuyama et al.(1992)	0.0003

$Q_p = 0.019V^{0.79}$	Muddy debris flow	Mizuyama et al (1992)	0.0039
$Q_p = 0.006V^{0.83}$	Volcanic debris flow	Jitousono et al. (1996)	0.0065
$Q_p = 0.04V^{0.90}$	Bouldery debris flow	Bovis and Jakob (1999)	0.0002
$Q_p = 0.003V^{1.01}$	Volcanic Debris flow	Bovis and Jakob (1999)	0.0008
$Q_p = 0.001V^{0.87}$	Volcanic Debris flow	Jitousono et al. (1996)	0.0247
$Q_p = 0.1V^{0.83}$	Bouldery debris flow	Rickenmann (1999)	0.0002
$V^* = 0.5Q_p t_f$	Debris flow	Método 3 puntos* (1993)	0.0781

4 Modelación del flujo de marzo 2015

4.1 Hidrología de la Superficie

El primer paso para desarrollar la modelación es generar una red de drenaje a partir del DEM de la zona procesado para rellenar errores/hoyos que podría tener y así asegurar el flujo sobre la superficie. La herramienta crea un raster de drenaje identificando la ubicación de las celdas donde la acumulación de flujo del raster es mayor o igual que al parámetro definido como “umbral de drenaje” el cual se le dio un valor de 1000. El resultado del drenaje es de alta precisión, de color azul en la Figura 46, donde también se observa como el drenaje modelado coincide con el drenaje mapeado por SERNAGEOMIN el 2010 y coincide con el deposito mapeado en terreno y con imágenes satelitales, así confirmando la precisión de la herramienta utilizada.

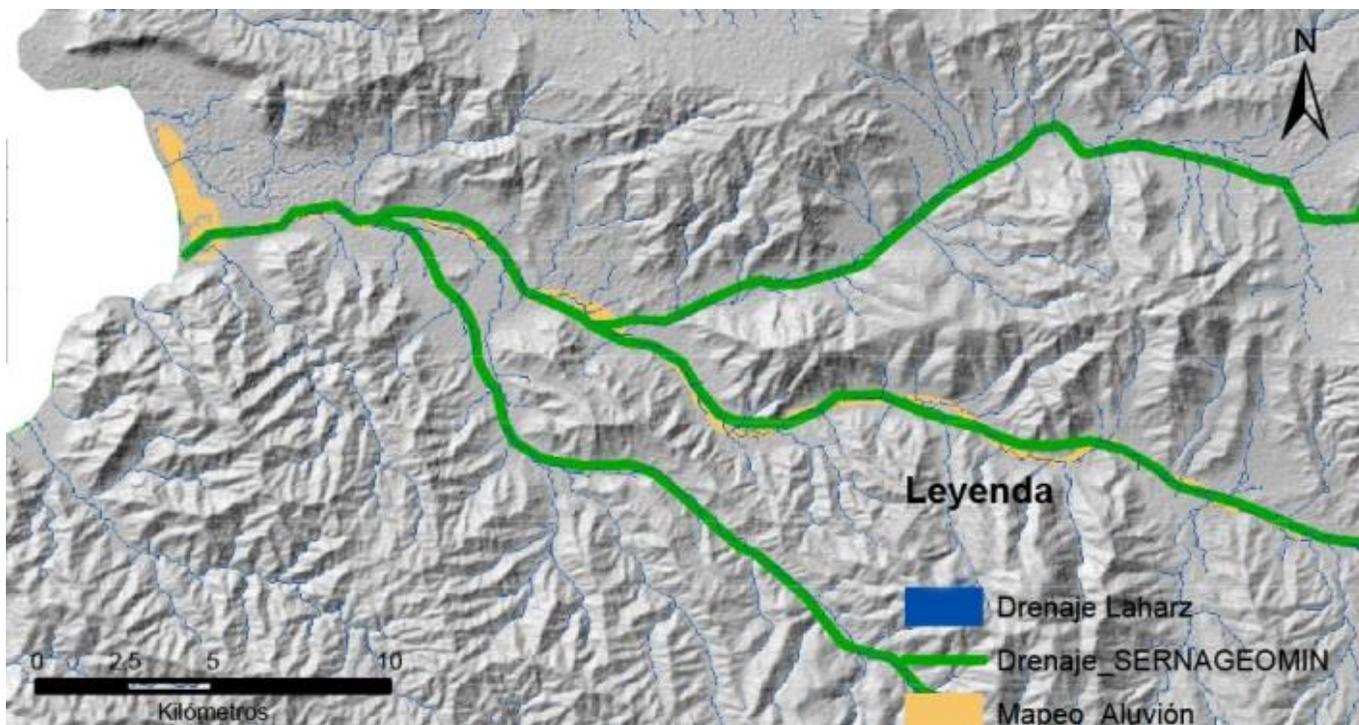


Figura 46: Comparación del drenaje modelado en laharz con el realizado por SERNAGEOMIN (SERNAGEOMIN,2010) y el mapeo realizado del aluvión-

También se logró observar que la modelación genera el drenaje correspondiente a la superficie de escorrentía que confluye al río Salado al Este de la ciudad de Diego de Almagro como se observa en la Figura 47., donde las marcas dejadas por la reactivación del drenaje en la imagen satelital coinciden en general con el drenaje modelado en el DEM por lo que se considera que la herramienta hidrológica de LAHARZ es representativa.

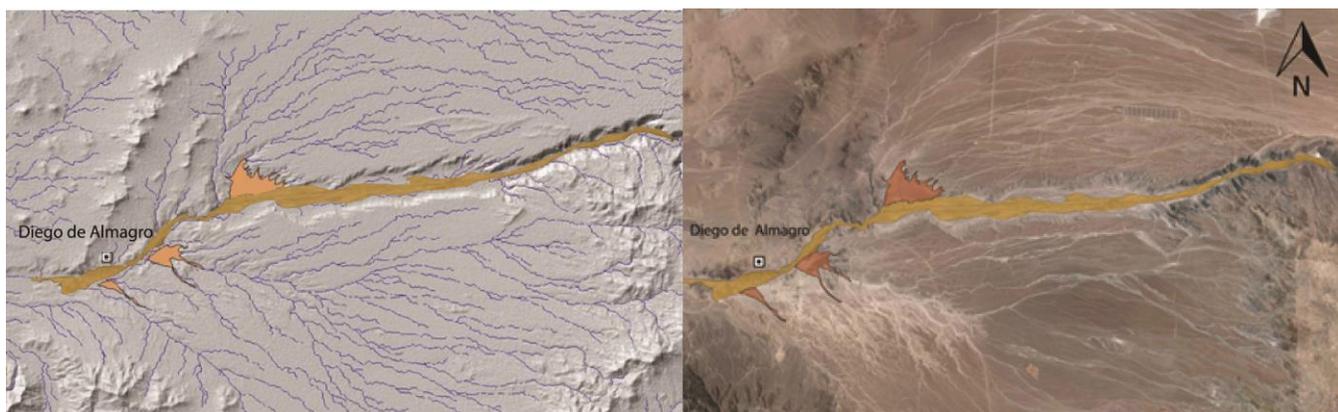


Figura 47: comparación de la modelación de drenaje en LAHARZ usando DEM STRM 30 (izquierda) con el drenaje superficial observado en las imágenes satélites

4.2 Punto de Partida

El parámetro del punto de partida es uno importante a definir, ya que al contrario al caso de los lahares donde su fuente es un volcán, para el caso del aluvión gran área de la cuenca se encuentra afectada por precipitaciones, desde áreas más altas hasta la zona costera como se observa en la Tabla 1, lo cual genera aporte al flujo aluvial desde casi la totalidad de la red de drenaje. Considerando la morfología de la cuenca la cual genera un efecto embudo del flujo, y teniendo en consideración la ubicación de uno de los grandes aportes como es la quebrada de Chañaral Alto, mencionado en los resultados del mapeo, observados en la Figura 19 y de la confluencia del drenaje observada en la Figura 20, se determinó como punto de partida el observado en la Figura 48. Por lo tanto se tomó esto en consideración para la modelación del flujo hacia las ciudades de Salado y Chañaral.

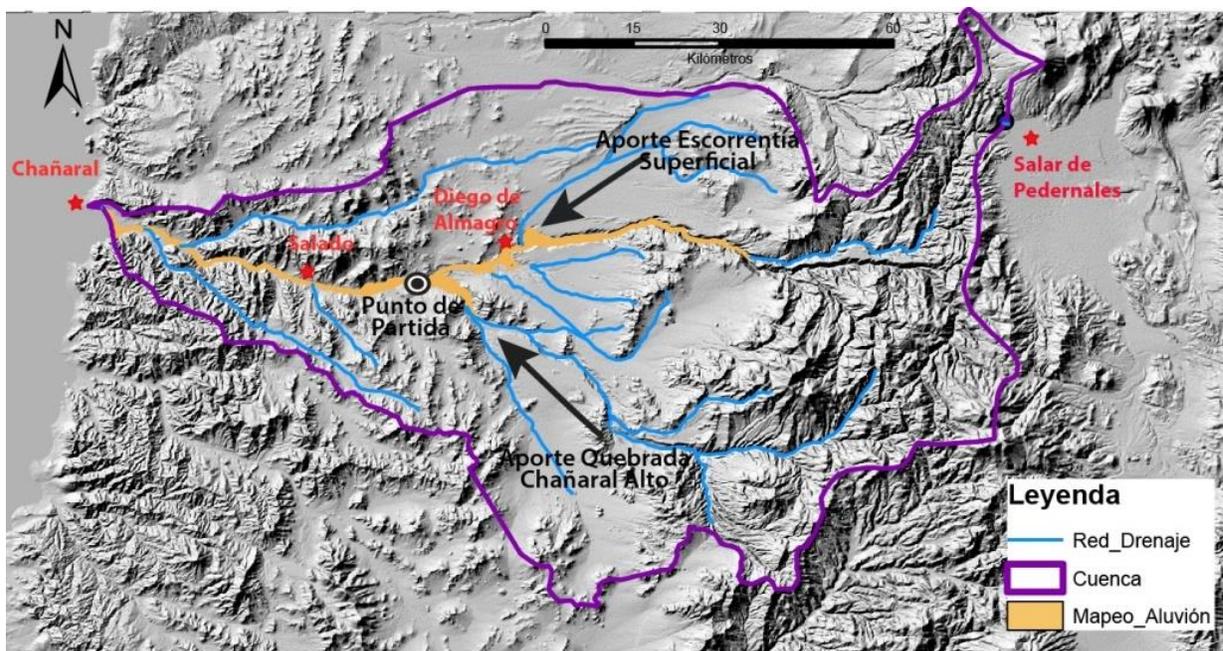


Figura 48: Imagen DEM STRM30 donde se observan las localidades principales, el límite de la cuenca, la red de drenaje principal, el mapeo de la inundación del aluvión, la ubicación de los aportes principales que confluyeron al río Salado y el punto de partida de la modelación con LAHARZ.

Es importante destacar que se simuló distintos puntos de partida y se observó que no existen diferencias significativas en la geometría del área de inundación del aluvión, pero sí en su alcance. Se considera que la ubicación del punto de partida no cambiaría la zonificación de peligros al menos en el tema del ancho de la inundación. Este comportamiento de la modelación también se observó en la modelación de lahares de Villarrica con LAHARZ (Bono, 2014).

4.3 Resultados de la Modelación

La realización del mapeo de la inundación a lo largo de la cuenca del río Salado ayudó a determinar los límites de estos, para así compararlos con los resultados de la modelación

Se hicieron pruebas con distintos volúmenes por medio de una sola descarga. Para el caso en estudio se realizaron pruebas con volumen de ordenes mayores y menores pero sobreestimaba o subestimaba el evento lo cual no fue considerado para el estudio. Se presentan los resultados de las simulaciones con volúmenes que alcanzaban la desembocadura del río al mar, $9,8 \times 10^7$, 1×10^8 , Volumen integrado (113.109.715), $1,2 \times 10^8$, $1,25 \times 10^8$, $1,3 \times 10^8$, $1,35 \times 10^8$ m³ en una única descarga del flujo como se observa en la Figura 49.

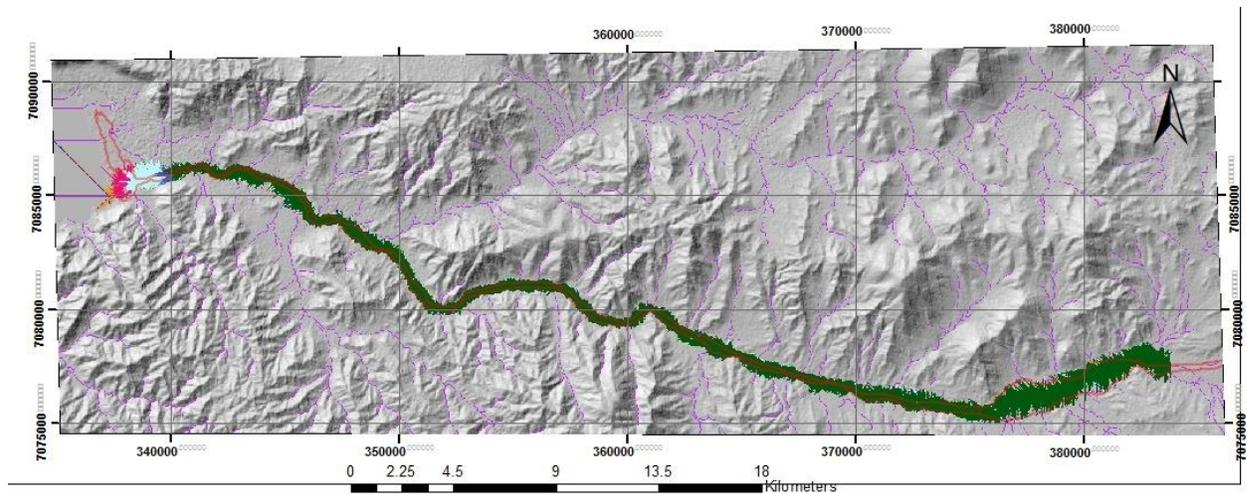


Figura 49 : Resultado de la modelación con el nuevo script en LAHARZ, desde el punto de partida mencionado anteriormente (simbología de colores se muestra en detalle en la Figura 50).

En la Figura 49 se exponen los resultados de las simulaciones en el DEM, donde se puede observar la comparación de la modelación con el mapeo presentado en resultados que representa el límite de inundación. En general se observa que la geometría modelada se ajusta bien a los límites mapeados a partir de las imágenes de *Google Earth*. Hacia el Este existe una sobreestimación del flujo en el punto de partida de la modelación, lo cual se considera un error asociado a la ubicación del punto de partida. En el extremo oeste se observa también una sobrestimación de la modelación en los sectores menos encajonados de la quebrada del río Salado.

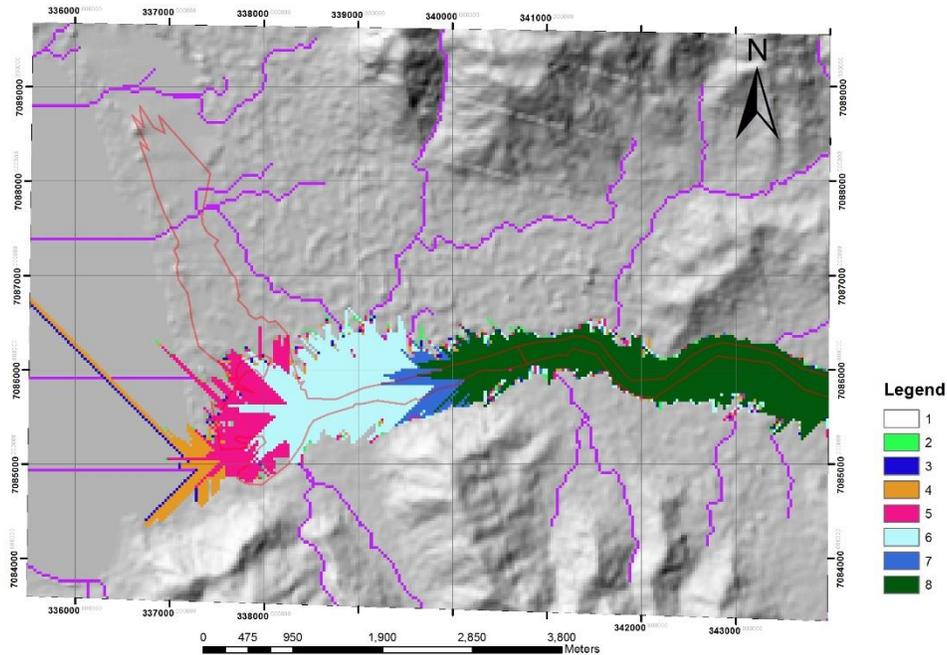


Figura 50 : Zoom en la ciudad de Chañaral mostrando el resultado de la modelación en LAHARZ. La leyenda corresponde a los siguientes valores de volúmenes; verde (2)= $1,35 \times 10^8 \text{ m}^3$, azul(3)= $1,3 \times 10^8 \text{ m}^3$, naranja(4)= $1,25 \times 10^8 \text{ m}^3$, fucsia(5)= $1,2 \times 10^8 \text{ m}^3$, celeste(6)=Volumen integrado ($113.109.715 \text{ m}^3$), calipso(7)= $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ y verde oscuro(8)= $9,8 \times 10^7 \text{ m}^3$.

En la Figura 50 se puede observar específicamente la modelación en la ciudad de Chañaral que es donde desemboca el río Salado al mar. Podemos ver que en el sector este de la ciudad existe una sobrestimación de la modelación hacia la ladera norte del río, asociándole a la inundación final que se genera en el abanico final. En el límite sur de la inundación se observa que coincide exactamente con el límite del mapeo y por consiguiente con el límite natural de la terraza. Hacia el norte en el sector de la playa de las Ánimas de Chañaral, la modelación no coincide con la morfología que dejó el paso del aluvión, siendo la morfología dejada por éste asimétrica en comparación a un abanico aluvial normal.

5. Discusión

Son muchos los factores y resultados del aluvión que son importantes para entender este evento, los cuales se han simplificado en este esquema conceptual.

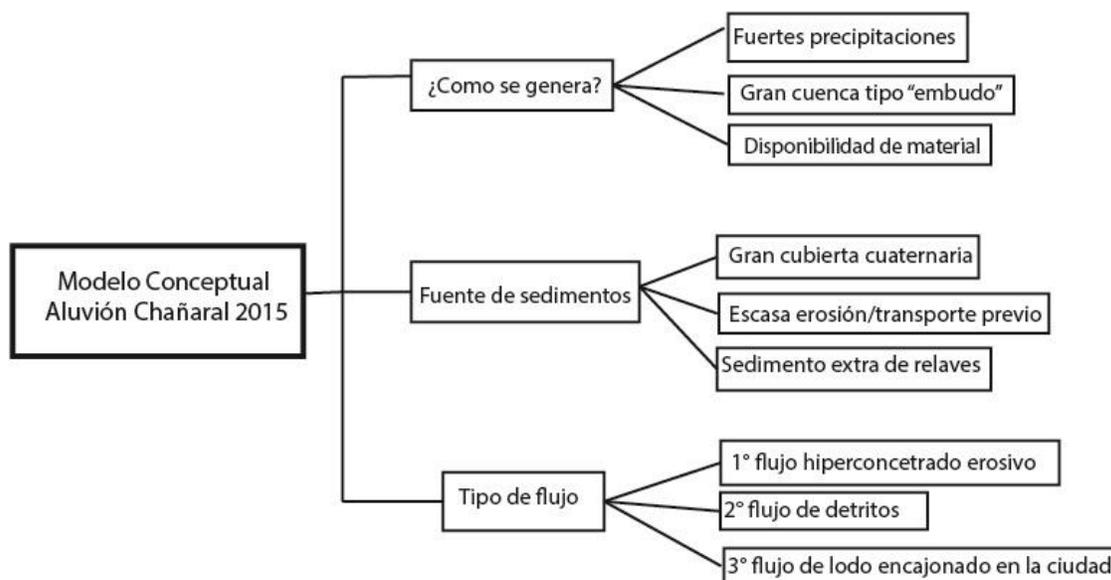


Figura 51 : Mapa conceptual del aluvión de Chañaral.

5.1 Comparación de la naturaleza del flujo a partir de los resultados de los depósitos y según la respuesta al caudal en el tiempo

La nomenclatura de estos eventos es ambigua en la literatura internacional (Sharpe, 1939; Varnes, 1958; Polanski, 1966; Johnson y Rodine, 1984; WP/WLI, 1990, 1991, 1993; Zaruba y Mencl, 1982; Corominas *et al.*, 1996; Hungr, 2005; Vargas *et al.*, 2000). Si bien en los depósitos de la ciudad de Chañaral según la sedimentología corresponden a un flujo de lodo, se considera que a lo largo de la cuenca el aluvión se comportó en un principio como un fluido hiperconcentrado principalmente por su capacidad erosiva (Jiongxin, 1999), para luego transformarse en un flujo de detrito (Pierson, 2005) ya que en ellos más del 50% de las partículas son de tamaños mayores a la arena (Varnes 1978), mientras que los flujos de barro los sedimentos están compuestos predominantemente por limo y algunas partículas de arcilla y arena fina, lo que no coincidiría con el hecho de que el tamaño más grandes de las partículas que transportó corresponde a casas completas y camiones como se observa en la Figura 52, actuando como un fluido newtoniano (Aulistky, 1980). Esto correspondería a un flujo con al menos un 60% de su volumen correspondiente a sedimentos (Pierson and Costa, 1987). Al llegar a la ciudad de Chañaral este flujo se va encajonado en la ciudad, aumentando su área lateral en forma de un flujo de lodo.



Figura 52 Fotografía de un camión de transporte de Ácido Sulfúrico en la desembocadura del Río Salado en la ciudad de Chañaral que representa la capacidad de transportar “clastos” tamaño bloque.

Por otro lado, se pueden realizar comparaciones cualitativas según el comportamiento de la dinámica de flujo, al menos para la ciudad de Chañaral, observando los gráficos de caudal tiempo como se puede observar en la Figura 53, en el cual se compara con flujo de detritos y con flujos hiperconcentrados provocados por un aumento de las precipitaciones, tal como es el caso de estudio. Los flujos de detrito son el Río Name (Takahashi,1991) en Japón y el Río Chemolgan (Khegai et al.,1992) en Kesajistán, mientras que el flujo hiperconcentrado es el Río Amarillo (Van Maren et al., 2008) en China.

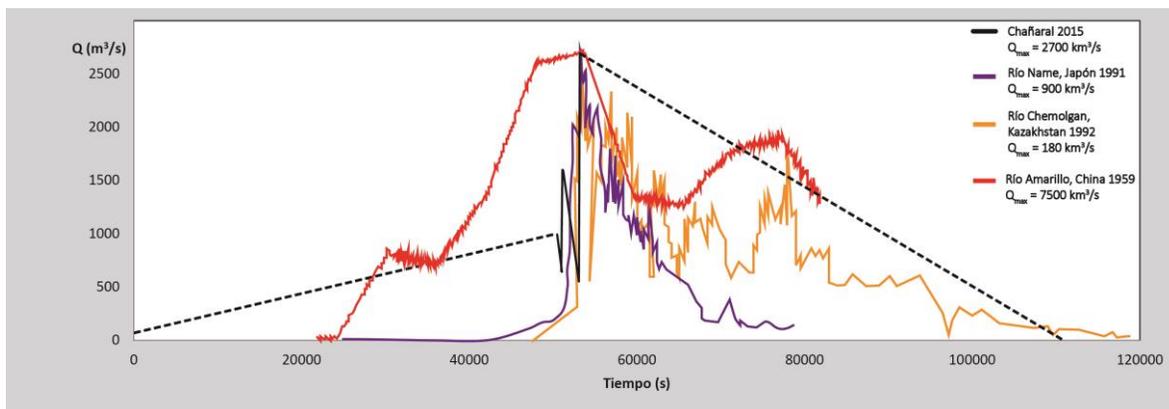


Figura 53 : Grafico cuadal tiempo donde se hacen un análisis comparativo con distintos flujos mencionados en la figura.la línea punteada refleja que no existe datos en esa zona.

La Figura 53 fue recreada usando como punto en común el *peak* de los flujos, para así dividir la discusión en tres partes, **pre-peak**, **peak** y **post-peak**.

Pre-Peak: Existe una gran sección la cual está interpretada por falta de datos, la cual se puede considerar una sobrestimación, por lo que se deja con línea punteadas. Esta representación del caudal del evento en Chañaral, cualitativamente es más parecida a un flujo de detritos como en el Río Name (Takahashi,1991) y el Río Chemolgan (Khegai et al.,1992), especialmente en la parte más cercana al máximo (*peak*); cabe de agregar que los videos y los testigos

hablan de la llegada de una “ola” lo que provocaría un cambio brusco de caudal tal como se observa en los los flujos de detrito de Japón y Kesajistán. El aluvión de Chañaral difiere bastante con el flujo hiperconcentrado de China (Van Maren et al., 2008) ya que este alcanza más paulatinamente el *peak*.

Peak: Comparativamente, los que alcanzaron menores *peaks* fueron los flujos de detritos como se observa en la Figura 53 (180 y 900 km³/s), luego el caudal de 2700 km³/s del aluvión de Chañaral, mientras que el flujo hiperconcentrado (Van Maren et al., 2008) lo supera con creces con 7500 km³/s, un caudal bastante alto característico de estos flujos (Julien y León, 2000). Esto concordaría con el hecho de una clasificación intermedia tipo *Flujo de Lodo*, realizada con la granulometría.

Post-Peak: Si bien es una sección con poca representatividad de datos, por lo que se dibujó con línea punteada, esta presenta una similitud cualitativa con los dos flujos detríticos, especialmente con el caso del Río de Chemolgan (Khegai et al., 1992), en el cual existe un descenso paulatino del caudal. Según testigos del aluvión el flujo tuvo un descenso lento durando meses, presentado una escorrentía superficial en el Río Salado no registrada en décadas.

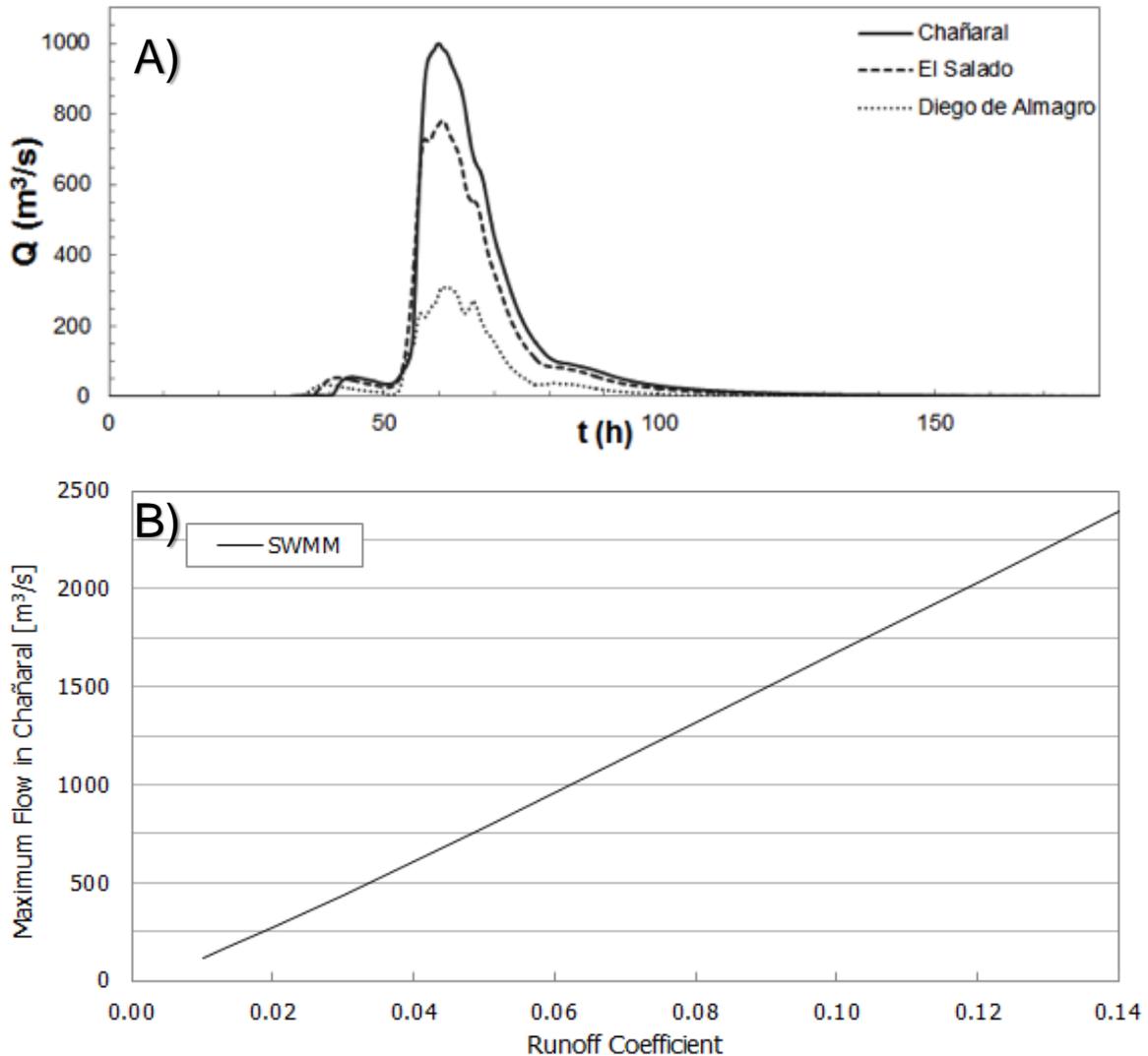


Figura 54: A: Curvas de caudal en el tiempo en las tres ciudades de la quebrada del Río Salado, simuladas con el Modelo de Manejo de Agua de Tormenta (Storm Water Management Model (SWMM)), para una concentración de sedimento de factor 0.2. El tiempo del eje X es del día 23 de marzo 2015. B: Resultados de la estimación del peak que descarga en Chañaral según el coeficiente de escorrentía (C_r). Tomado de Wilcox et al. (2015).

En la parte A de la Figura 54, se muestra la modelación del comportamiento según el caudal en el tiempo. Para obtener las curvas de caudal tiempo, usaron un Modelo de Manejo de Agua de Tormenta (*Storm Water Management Model (SWMM)*). Se calculó el máximo caudal combinando áreas transversales, áreas planimétricas, pendiente del canal y sus inferencias, geometría con ecuaciones de Manning y un coeficiente de escorrentía C_r promedio que equivale a 0.06 el cual representa el radio de escorrentía por total de lluvia (Chow et al., 1988). Usando todas estas variables estimó un **peak de 1000 m^3/s** para el caso de Chañaral. En la parte B de la Figura 54 se observan los rangos del máximo caudal según distintos coeficientes de escorrentía C_r ; cabe a destacar que según la modelación

de máximo flujo coincide con el rango de caudal por SERNAGEOMIN (~2500 m³/s) usando el valor máximo de Cr (0,14). En términos generales se puede observar una similitud en el sector *peak* del flujo de la curva caudal vs. tiempo modelada con la curva estimada en este trabajo, representada en negro en la Figura 53, lo cual habla de una tendencia a tener un comportamiento similar. El método de Wilcox et al. (2015) para modelar el *peak* máximo se consideran como de un orden subestimado ya que se tomaron datos teóricos para estimar factores influyentes y no se consideraron las fluctuaciones en los cambios de caudal del aluvión, factor el cual sí es considerado usando los distintos datos obtenidos en tiempo real por el SERNAGEOMIN, los cuales para este caso de estudio se consideran más representativos al comportamiento real del aluvión.

El análisis de la litología nos ayuda a entender el origen del material transportado y comprender el paso del flujo. Según el Capítulo 3, en general, según la descripción macroscópica, las muestras se inclinaron hacia los líticos específicamente de origen ígneo como se observa en los triángulos de la Figura 43 y Figura 44, esto no tomando en consideración el fragmento más fino de la muestra (menor 2 mm), para la cual es necesario realizar análisis de difracción de rayos X para determinar su mineralogía. Según lo observado en terreno, los sedimentos que se depositaron en Chañaral son provenientes principalmente de los depósitos no consolidados ya que se observó un descenso en el *talweg* (cauce) del río y los escarpes de erosión de los depósitos previos al evento como se observa en Figura 18. Estos depósitos corresponden a depósitos aluviales activos asociados a flujos de lodo (*mudflows*), con tamaños de grava a limo y mala selección, depósitos coluviales en las quebradas adyacentes a los cauces, sin matriz fina y de composición monomíctica (asociada a las unidades rocosas de las que se desprendieron), y depósitos coluviales inactivos en algunas zonas, de tamaño grava a limo y litológicamente controlados por el drenaje del río Salado (formando terrazas fluviales y marinas).

En la Depresión Central de la cuenca hay dos unidades no consolidadas importantes: los depósitos aluviales y coluviales antiguos (**DACA**) y las gravas de Atacama (**GdA**). Los **DACA** son de composición monomíctica, por lo general, con tamaños de grava a arena y niveles limitados de limo, con cementación de yeso y carbonato. Bajo estos depósitos, las **GdA** son de composición polimíctica, con tamaños que varían de ripio y grava hasta arena gruesa, en general estando los depósitos consolidados o cementados. El análisis de muestras de las **GdA**, realizado para el trabajo de Nalpas *et al.* (2008), indica que la composición para los clastos más gruesos es dominada por fragmentos andesíticos y, en menor medida, elementos plutónicos y sedimentarios (como calizas). Para las facies arenosas de esta unidad, también se tiene una dominancia volcánica en su composición, con una menor cantidad de fragmentos intrusivos y sedimentarios. La fuente potencial de estos sedimentos, volcánicos y plutónicos, se distribuye a lo largo de la cuenca, desde la Cordillera de la Costa a la Pre-Cordillera, mientras que los fragmentos sedimentarios provienen de la Pre-Cordillera hacia el Salar de Pedernales (Nalpas *et al.*, 2008). Se puede hablar, preliminarmente, que las **GdA**

indican la tendencia de los sedimentos transportados en general por la hoya del río Salado desde su formación, y que podrían eventualmente haber aportado parte del material de este y otros aluviones en el tiempo.

5.2 Análisis modelación en Laharz

En primer lugar, en la calibración de LAHARZ las modificaciones que se hicieron se realizaron en los coeficientes que acompañan las ecuaciones de simulación, que son datos empíricos obtenidos de ambientes geológicos diferentes, es por esta razón que se designó un valor que ajustaba mejor a la morfología de la inundación del aluvión en la cuenca del Río Salado. Además, se tomó el punto de inicio del aluvión con el fin de que los patrones simulados tengan los alcances que les corresponde. Aunque, se ha verificado que los patrones no varían mucho si es que el punto de inicio se considera en otra ubicación.

Cuando se trata de modelos computacionales, es importante considerar la precisión de los modelos topográficos que se utilizan debido a que es uno de los principales parámetros de entrada. Es importante ya que es el que define la forma del cauce que sigue el flujo. Además, todos los modelos de elevación digital tienen errores intrínsecos, que dependen de la precisión de la medición del terreno y los métodos utilizados para su construcción (Stevens *et al.*, 2002). Estos errores se ven luego reflejados al generar y evaluar las redes hidrográficas generadas por el script de LAHARZ en el DEM. Dentro de la disponibilidad de DEMs se eligió el de mayor resolución debido a su densidad de redes por área cuadrada, ya que con DEMs de baja resolución, la densidad de redes hidrográficas por área cuadrada es mucho menor, y estas tienden a ser más rectas (Bono, 2014).

Además, se observa que el DEM no replica los detalles en zonas donde el canal es más estrecho. Este fenómeno se debe a la resolución que tienen los DEMs, que no pueden replicar muchos detalles a pequeña escala.

LAHARZ determina áreas de inundación planimétricas, antes de efectuar la simulación, o sea ya se conoce cuál va a ser el área de inundación que ocupará el flujo que se esté simulando. Esta área depende del ancho que alcance el flujo en cada punto; si el ancho es menor, mayor es la distancia que alcanzará.

Se puede observar que los patrones de inundación están segmentados, como se observa en la Figura 50. Estos patrones segmentados marcan donde comienza y termina cada curva de nivel, la cual también ocurre con otros softwares tales como RAMMS (Bono, 2014).

La modelación se acercó en gran medida a la inundación real generada por el aluvión de marzo de 2015 tomando en consideración un área acotada de modelación, ya que LAHARZ solo entrega los patrones que dejan los flujos, y cabe a destacar que sólo sirve para determinar las áreas de inundación que pueden generar los flujos lo cual es útil para generar mapas de riesgos, pero no entrega

más datos del comportamiento de estos, para lo cual se recomienda efectuar las simulaciones en otros software donde exista la posibilidad de ingresar más parámetros y así generar una modelación más cercana a la realidad.

Finalmente cabe a destacar que las constantes transversales que se modificaron para generar el nuevo script se asemejaron de los valores predefinidos para flujos de detritos como se observa en la Tabla 2 y Tabla 3.

5.3 Volumen

Para poder resolver las dudas sobre el volumen total se usaron distintas metodologías para tener al menos una idea del rango de volumen para el aluvión de marzo 2015. Usando datos de caudal se estimó un volumen de 0,1 km³ según la integración de la curva de la Figura 45. Observando el comportamiento de flujos parecidos como se muestra en la Figura 53 y la modelación generada por Wilcox et al. (2015), que se muestra en la Figura 54, podemos entender la tendencia de esta curva, obteniendo una sobrestimación con el volumen integrado de al menos un 30%. Esto se debe a la baja cantidad de datos imposibilitando generar una curva representativa. Es importante considerar que se consideró el tiempo final de aluvión cuando el curso del río bajo de altura. El río originalmente es de régimen seco, o sea un curso inexistente, y continuó transportando agua hacia su desembocadura por meses.

Por otro lado, usando la clasificación por tamaños (Fell, 1994) el rango del volumen estimado se encuentra por muy sobre la mayor clase (7) como se observa en la Figura 55, lo que clasifica a al aluvión de marzo de 2015 como uno de los eventos más volumétricos según la bibliografía.

Size class	Size description	Volume (m ³)
1	Extremely small	<500
2	Very small	500–5000
3	Small	5000–50,000
4	Medium	50,000–250,000
5	Medium–large	250,000–1,000,000
6	Very large	1,000,000–5,000,000
7	Extremely large	>5,000,000

Figura 55 : Tabla de clasificación de tamaño de flujos (Fell, 1994).

Esto también se puede observar con los resultados empíricos de la Tabla 10, los cuales representaban otros casos estudiados en el mundo, los cuales subestiman en gran medida el volumen cuando reemplazamos el caudal máximo registrado y modelado (abajo en la Figura 54) del aluvión, entendiéndose así que no existe registro bibliográfico donde la relación del caudal se relación a este gran volumen.

El último dato de la Tabla 10, el asociado al método de los tres puntos (0,078 km³) es el que se acercó más al volumen integrado, y más aún si consideramos que existe una sobrestimación del 30% (0,077 km³).

Para tener otro dato de comparación podemos considerar el área de la cuenca con los milímetros precipitados para calcular el volumen de agua caída a la cuenca. Como se mencionó anteriormente existe bastante escorrentía superficial y poca infiltración, pero para este ejercicio se consideró un 50 % de infiltración. Con esto obtendríamos el volumen de escorrentía superficial, pero no considera el volumen de material que es arrastrado y erosionado por el agua, el cual se consideró un 50% como una composición promedio de este tipo de flujos como se observa en la Tabla 11.

Tabla 11: Volumen inferido del aluvión.

	Volumen inferido	
Ac=	Area de la cuenca [m ²]	7.40E+09
mp=	Metros precipitados[m]	9.00E-02
Va=	Volumen agua en la cuenca (Va) =Ac*mp [m ³]	6.66E+08
As=	Volumen agua superficial =Va*50%[m ³]	3.33E+08
	Volumen aluvión (Volumen sedimentos+ Va)[m ³]	6.66E+08
	Volumen aluvión [km³]	0.666

Esta estimación genera una estimación bastante mayor a las realizadas anteriormente, lo que puede considerarse como una cota mayor dentro de rango de posibilidades.

5.4 Impacto en el cambio geomorfológico de la zona de estudio.

Al activarse la quebrada del Río Salado, de un régimen seco a un flujo de gran envergadura generó cambios en la geomorfología a su paso. En primer lugar existió un proceso erosivo importante, siendo los más relevantes el socavamiento de las pendientes pronunciadas, de las terrazas fluviales y de los depósitos que generan los flujos previos al aluvión. La erosión genera la migración de los *Knickpoints*, además del arrastre de bloques como se observó en la Figura 18. Existe una combinación de factores para la acumulación de agua y sedimentos según Jordan et al. (2015). Cuencas de grandes pendientes conectadas a la Cordillera de Domeyko como el caso del estudio, suelos no tan permeables ricos de arcillas y sulfatos y grandes áreas expuestas de roca. También existe una corteza en los suelos del Desierto de Atacama generando una barrera para la difusión de la humedad en el suelo (Davis et al, 2009). Estos factores fueron importantes para la escorrentía superficial en laderas, ya que sin estas condiciones es probable que el agua hubiese sido absorbida por los suelos. Otro factor importante que menciona Jordan et al. (2015) en la energía del flujo es el

gran cambio de pendiente que se observa en la Figura 6, donde el cambio de la Precordillera a la Depresión Central es bastante abrupto.

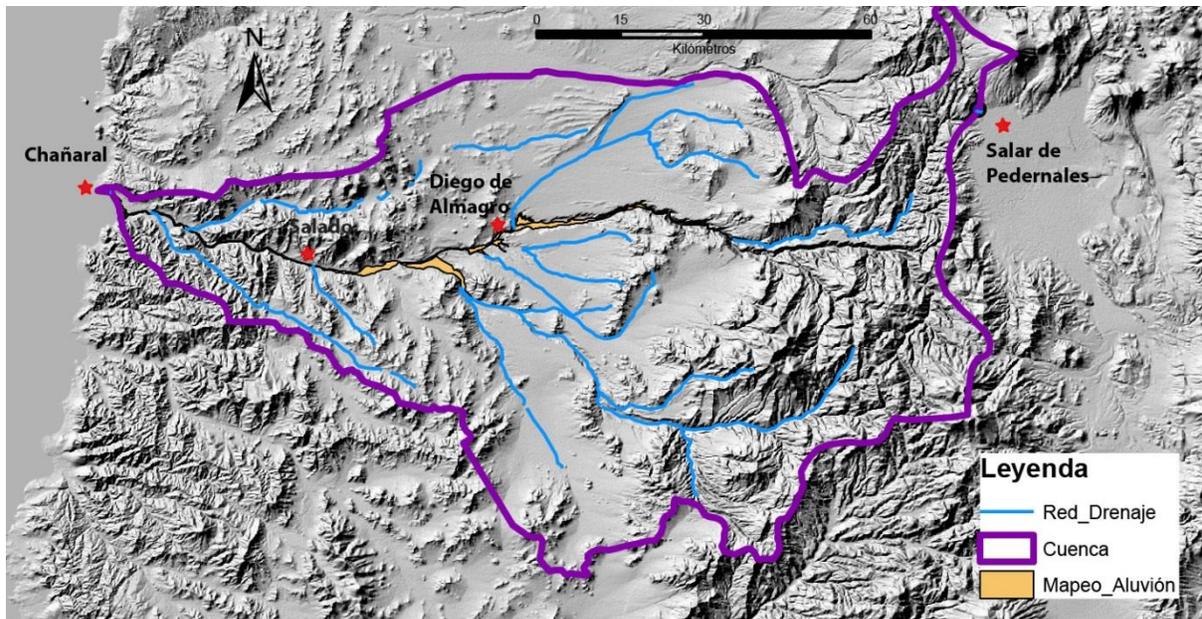


Figura 56 : Imagen DEM que muestra la morfología de "embudo" de la cuenca con su drenaje principal, el mapeo de la inundación del aluvión y las ciudades principales

Como se observa en la Figura 56, los ríos tributarios de la cuenca el Salado, desde Cordillera de la Costa a la Cordillera Occidental, se encausan y desembocan en el Río Salado que es el único cauce que desemboca en el mar precisamente en la ciudad de Chañaral, debido a la forma de embudo que posee. Esto se contrapone con el caso del aluvión de Antofagasta en 1991, ya que la cuenca de ese sector desemboca en 4 hoyas importantes y al menos 9 menores (Vargas et al, 2000) siendo la ciudad de Antofagasta afectada por el aluvión por distintos flancos, desapareciéndose en energía y volumen.

Otro factor importante en la distribución del aluvión en la ciudad de Chañaral es la presencia de terrazas marinas y depósitos aluviales antiguos. Se pueden reconocer 2 niveles costeros los cuales corresponde a depósitos aluviales previos según el marco geológico. Este cambio de nivel en la ciudad se puede visualizar en los gráficos de en la Figura 16. También se pueden observar en la Figura 57 donde se observa la ubicación en planta de las terrazas y su interpolación en Surfer.

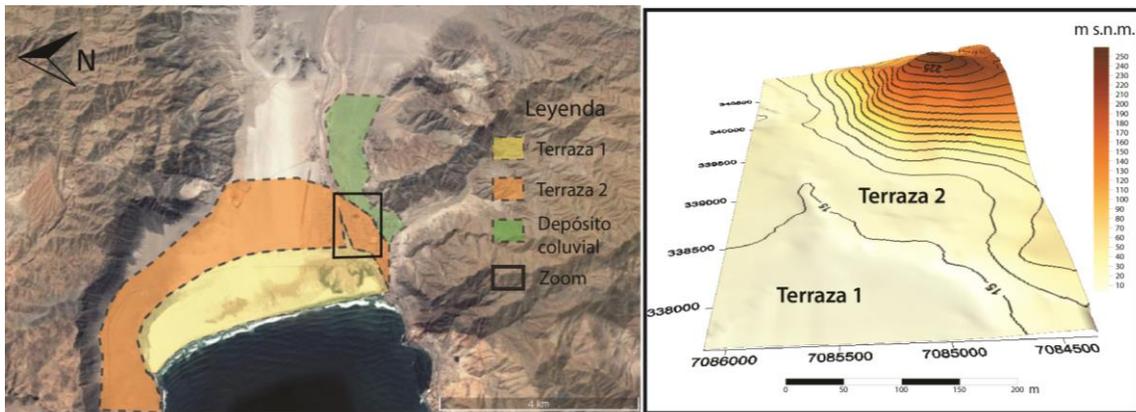


Figura 57: Terrazas de la ciudad de Chañaral. A la izquierda se ve la imagen satelital en planta de la ciudad de Chañaral con el límite de las terrazas determinado con los datos de GPS diferencial. El cuadrado representa al zoom presentado a la derecha donde se muestra la modelación en 3D realizada en Surfer.

La terraza es un elevación del relieve en la ciudad, la cual actuó como un límite natural de inundación en el sector sur de la desembocadura del río Salado, tal como se observa en la modelación de la Figura 58 y en el mapeo con imágenes satelitales, protegiendo de esta forma la parte alta sur de la ciudad de Chañaral.

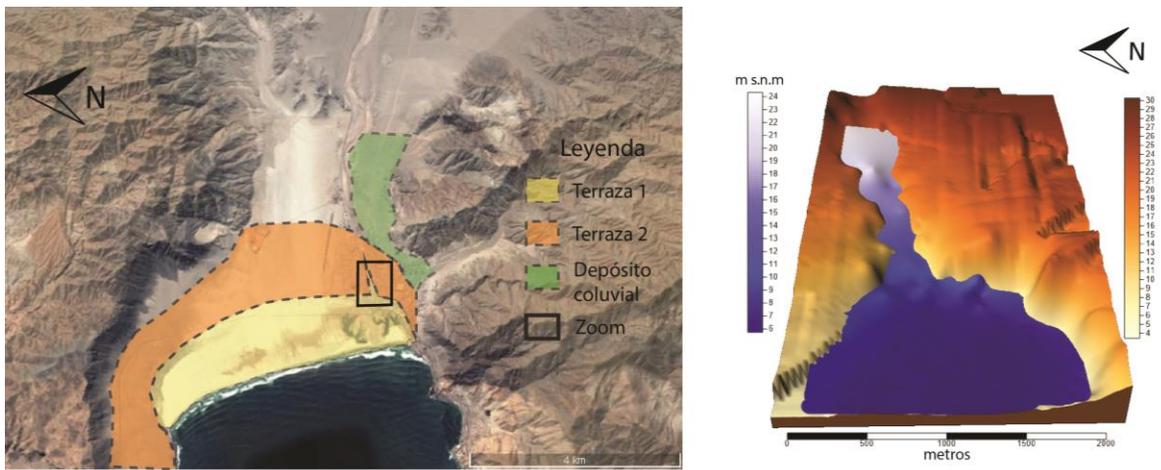


Figura 58: A la izquierda se ve la imagen satelital en planta de la ciudad de Chañaral. El cuadrado representa al zoom presentado a la derecha donde se muestra la modelación en 3D realizada en Surfer de la topografía(naranja) y de la inundación(azul) con los datos sacados en terreno.

El factor que afectó en la inundación de lado sur del Río Salado, fueron las calles y construcciones con dirección N-S actuaron como canales, aumentando la inundación en la confluencia de éstas con las calles de dirección E-O como se

observa en algunos altos de la modelación de la inundación de la Figura 58 y en la barras de inundación de la Figura 14.

La impermeabilidad de la pavimentación de la ciudad al parecer también pudieron jugar un rol, ya que se observa una mayor altitud de inundación en la ciudad, en comparación con el lecho del río en las cercanías de la ciudad, donde las alturas de inundación son menores debido a la permeabilidad del lecho del cauce, como se observa en la Figura 14. Por otro lado, testimonios de ciudadanos de Diego de Almagro, observaron este mismo comportamiento al relatar que la inundación se observaba más alta dentro de la ciudad, en comparación a la altura de inundación en el cauce del río.

Otro factor que parece ser importante es uno de origen antrópico, provocado por la carretera de la Ruta Norte 5 que cruzaba el río como se ve en la Figura 14: Imagen satelital de Google Earth 2015 modificada mostrando en barras los 60 datos obtenidos en terreno. La parte roja representa los niveles de depósito, mientras que la parte azul la inundación. Las líneas punteadas representan la carretera ruta 5 norte. En tonos anaranjados se observa el área de inundación del aluvión. En el lado Oesteeste, en morado se demarca la línea de costa pre-aluvión. Las alturas han sido exageradas para ayudar a su interpretación. Esta, al tener pequeños orificios para el desagüe hacia la desembocadura del río, generó un efecto dique, lo que probablemente provocando una extensión de la inundación en la dirección N-S. La carretera bloqueó el flujo, provocando un abombamiento de los niveles de inundación en esa intersección con la carretera como se observa en la Figura 14 y también fue reportado por testigos locales, generando así un desborde, evidenciado también por las facies finas que generó el desborde especialmente en el extremo norte de la inundación en la playa. La carretera finalmente colapsó, derrumbándose y permitiendo el curso hacia la desembocadura.

Los depósitos aluviales y depósitos eólicos del Holoceno, que forman parte de la Bahía Chañaral de las Ánimas, los cuales han ido evolucionando debido al aporte de relaves mineros, también fueron afectados por el aluvión.

En la Figura 59 se observa la evolución histórica de la línea de costa de Chañaral, agregando a la información presentada en resultados se le agregó la estudiada por Paskoff y Petiot (1990). Las fuentes de los datos se encuentran especificados en la Tabla 12.



Figura 59: Representa a la Figura 24 modificada, agregando información de líneas de costa extraída de Paskoff y Petiot (1990). La distinta fuente de datos se encuentra representada en Tabla 12.

Tabla 12: Tabla sobre la fuente y escala de las distintas líneas de costa de la Figura 59 Los años con asterisco es información extraídos de Paskoff y Petiot (1990). Doble asterisco son datos del Vuelo Hycon 1954 que coincidieron con los datos de Paskoff y Petiot(1990).

Año	Fuente	Escala
1897*	Carta náutica del Almirantazgo Británico	1:25.000
1954**	Fotos Aéreas vuelo Hycon	1:70.000
1964*	Mapa Batimétrico	1:5.000
1969*	Mapa Batimétrico	1:10.000
1986*	Fotos Aéreas a color	1:30.000
2014	Imagen satelital Google Earth	1:30.000
2016	Imagen satelital Google Earth	1:30.000

Al ser una cuenca de régimen seco se considera que existe una estabilidad en la playa, siendo el aporte de sedimentos naturales raro y excepcional, acotado a inundaciones y aluviones. Resultado de los desechos de relave aportados al río por 37 años aumento el área de la playa original perdiéndose el equilibrio existente. La línea de costa progradó entre el 1938 y 1975 a una tasa de 20-25 m/año, siendo mayor en la parte norte y central de la bahía (Paskoff y Petiot, 1990). Al parar el aporte artificial de sedimentos, comenzó un proceso natural de erosión de la bahía la cual retrogrado la línea de costa, volviendo en el 2014 a la configuración que existía en 1964. Este retroceso fue en promedio de unos 365

metros, con una tasa de erosión de 13 m/año, estimada desde 1986 al 2014 con la información de la Figura 59. El aluvión también tuvo una parte erosiva en la desembocadura del Río Salado, generando grandes socavones, que en algunos sectores, regresó la línea de costa al estado en que se encontraba en 1897, infiriendo un intento de regreso de la playa a su estado original pre-relave.

Del 2015 al 2016, en las salidas de los socavones, se generaron barras de arenas en la línea de costa del 2014, en un intento de la playa de encontrar una estabilidad con los sedimentos en suspensión del mar y el aporte eólico de la arena hacia NNE NE.

6 Conclusiones

Luego de estudiar el aluvión de Chañaral de marzo de 2015, podemos decir que el flujo estudiado tuvo en un principio características de un *flujo hiperconcentrado* por su actuar erosivo, pasando luego a un *flujo de detritos* por su capacidad de transporte (Varnes, 1978), el comportamiento del caudal en el tiempo (Iverson, 1997) y por la tendencia de las constantes que definen las áreas transversales y planimétricas de las en la modelación con LAHARZ en gran parte del río Salado. Luego el flujo llegó a la ciudad de Chañaral como un *mudflow* o flujo de barro, con una alta energía, turbulencia y una gran carga de sedimentos finos. Factores como la gran cantidad de agua precipitada en un evento asociado al fenómeno del Niño, principalmente en la zona de la Pre-Cordillera, donde nace la cuenca del río Salado junto con la gran disponibilidad de material coluvial, aluvial y remoción de taludes rocosos, en conjunto de sedimentos finos generó un volumen de muy grandes proporciones. Otro factor determinante es la morfología de la cuenca del río Salado que tiene una marcada pendiente en el cambio de la geografía de la cuenca al pasar de precordillera a depresión intermedia: Esto, sumado a la forma de “embudo” de la cuenca en estudio, le otorga mayor energía al flujo el que desciende hacia el oeste y sólo desemboca en la Bahía de Chañaral, siendo bastante destructivo. Las dimensiones de este evento son grandes en comparación a otros eventos en el mundo, volumen el cual fue calculado usando datos de caudal tomados en tiempo real por el SERNAGEOMIN, el cual es más probable que se acerque a la realidad que el caudal modelado. Esta extraña ocurrencia de la precipitación puede obedecer precisamente a un evento extremo El Niño, de los cuales se han tenido antes en los años 1983 y 1997, y ahora finalizando, el 2015, los que pueden haber tenido su origen, al menos en la intensidad, en factores de cambio climático antrópico global (Grijalba, 2016).

Se logró visualizar mediante la modelación de Laharz, el mapeo de la inundación y la modelación 3D lo determinante que es la terraza como morfología en la ciudad de Chañaral ya que actuó como límite natural de la inundación hacia el lado sur siendo el efecto dique que generó la carretera no determinante al menos para ese lado. También se puede observar que hacia el lado norte de la playa la inundación se extendió más de lo normal, siendo la carretera una posible causal.

Trabajando con DEMs o creando DEMs de mejor calidad se podrían obtener resultados más precisos con la modelación, pero analizando la estimación de la geometría del área de inundación se consideró que el software LAHARZ es adecuado para generar mapas de peligro geológico, especialmente en casos cuando gran parte del volumen de aluvión se descargó en el mar. Estos mapas son importantes para la planificación urbana, la cual debería ser obligatoria para cada ciudad para así aportar a la seguridad de la población en caso de que se repita este suceso.

Para mejorar el estudio del cambio climático y en específico el tema de los flujos aluviales que afecta principalmente durante periodos de El Niño, es necesario que exista una mayor investigación en relación a los depósitos de aluviones antiguos

para tener una base de datos que precise la geometría, sedimentología y granulometría de cada evento aluvial, ya que estudiando el pasado podemos entender el futuro, especialmente en el norte de Chile en que son las zonas más propensas para estos sucesos. Como medida mitigadora se recomienda construir piscinas aluviales que para el caso de Taltal contuvieron durante un tiempo las aguas hasta que se desbordaron, disminuyendo los efectos devastadores del aluvión.

Finalmente, los cambios en la línea de costa hablan del carácter erosivo que tuvo el aluvión en su desembocadura y también a lo largo de su paso como se mostró en este trabajo, pero también evidencia un problema de primer orden que es la perturbación del equilibrio de la costa de Chañaral con los relaves de la minería. Esto generó cambios importantes en la línea de costa, en los depósitos de fondo marino de la zona, en las especies autóctonas de la zona (Correa et al., 1999) las cuales también afecta económicamente porque son fuentes de trabajo, efectos negativos para la salud (Cáceres, 2015), entre otros problemas, los cuales es necesario que sean tratados con urgencia interdisciplinariamente para mejorar la calidad de vida de los Chañaralinos.

7 Bibliografía

BONO L. 2014. Modelación de los lahares del Volcán Villarrica en el sector de Pucón, Región de la Araucanía. Tesis para optar al grado de Geóloga. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 139p.

CÁCERES D. 2015. Evaluación de los efectos agudos en la función pulmonar por exposición a material particulado fino (MP 2.5) en niños que viven próximos a una playa contaminada con relaciones mineros, Chañaral, Chile. Tesis para optar al grado de Doctor en Pediatría, Obstetricia y Ginecología, Medicina preventiva y salud pública. Barcelona, Universidad Autónoma de Barcelona, Facultad de Medicina. 180p.

CASTRUCCIO A. 2008. Comparación y modelación numérica de lahares calientes en el Volcán Calbuco (41,3°S) y lahares fríos en el Volcán Villarrica (39,5°S), Andes del Sur. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias, mención Geología. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 187p.

CHOW, V. T., D. MAIDMENT, y L. W. Mays (1988), Applied Hydrology, McGraw Hill, New York.

COLLINSON J.D. 1996. Alluvial sediments. En: READING H.G. (Ed.) Sedimentary Environments: Processes, facies and Stratigraphy. 3ª ed. Oxford, Blackwell Publishing. pp. 37-82.

CONTRERAS J.P., RAMÍREZ C., GARRIDO N. y NÚÑEZ G. 2015. Caracterización hídrica de los aluviones del 25 y 26 de marzo de 2015 en la cuenca del Río El Salado, Región de Atacama, Chile. En: XIV CONGRESO GEOLÓGICO Chileno: AT3, SIM12 Los aluviones de Atacama: context, causas y efectos: 6 de octubre de 2015. Chile, La Serena, Casino Enjoy Coquimbo. Sociedad Geológica de Chile. pp. 4.

CORNEJO P., MPODOZIS C. y TOMLINSON A.J. 1998. Hoja Salar de Maricunga, Región de Atacama. Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería. Esc. 1:100.000. Color.

CORNEJO P., RIQUELME R. y MPODOZIS C. 1998. Mapa Geológico de la Hoja Salvador, Región de Atacama. Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería. Esc. 1:100.000. Color. Versión preliminar.

CORREA, J. A., CASTILLA, J. C., RAMÍREZ, M., VARAS, M., LAGOS, N., VERGARA, S., ... & BROWN, M. T. 1999. Copper, copper mine tailings and their effect on marine algae in northern Chile. In Sixteenth International Seaweed Symposium, Springer Netherlands. pp. 571-581.

CORTÉS M. 2010. La muerte gris de Chañaral: El libro negro de la División Salvador de CODELCO Chile. Chañaral, Chile. Agrupación Ecológica Chadenatur. 146p.

CRUDEN, David M.; VARNES, David J. Landslides: investigation and mitigation. Chapter 3-Landslide types and processes. Transportation research board special report, 1996, no 247.

DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA UNIVERSIDAD DE CHILE. 2015. Caracterización Meteorológica de la tormenta del 24 al 26 de Marzo de 2015 en Atacama y Antofagasta. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geofísica. pp. 23.

FOLK R.L. 1966. A review of grain-size parameters. *Sedimentology* 6(2):73-93.

FOLK R.L. y WARD W.C. 1957. Brazos river bar: A study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology* 27(1):3-26.

GARREAUD R. y RUTLLANT J. 1996. Análisis meteorológico de los aluviones de Antofagasta y Santiago de Chile en el período 1991-1993. *Atmósfera* 9:251-271.

GARREAUD R., VUILLE M, y CLEMENT A.C. 2003. The climate of the Altiplano: observed current conditions and mechanisms of past changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 194 (1-3):5-22.

GARRIDO N. "et al". 2015. Definición de áreas de evacuación, acopio y reconstrucción post aluviones 03/2015 en las comunas de Chañaral, Salado y Diego de Almagro, III Región, Chile. En: XIV CONGRESO GEOLÓGICO Chileno: AT3, SIM12 Los aluviones de Atacama: context, causas y efectos: 6 de octubre de 2015. Chile, La Serena, Casino Enjoy Coquimbo. Sociedad Geológica de Chile. pp. 4.

GERENCIA DE SUSTENTABILIDAD, Seguridad y Salud Ocupacional. 2015. Informe Evento Meteorológico 24-25-26 Marzo 2015. División Salvador, CODELCO, Chile. 30p.

GODOY E. y LARA L. 1998. Hojas Chañaral y Diego de Almagro, Región de Atacama. Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos N°5-6. Esc. 1:100.000. Color.

GODOY E. y LARA L. 1999. Hoja Puerto Flamenco, Región de Atacama. Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos N°15. Esc. 1:100.000. Color.

GODOY E. y LARA L. 2005. Hoja El Salvador Occidental, Región de Atacama. Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos N°90. Esc. 1:250.000. Color.

GONZÁLEZ F., GRIJALBA V., VARGAS G. y GONZÁLEZ J. 2015. Mapeo de la inundación y depósitos de Chañaral de marzo de 2015. En: XIV CONGRESO GEOLÓGICO Chileno: AT3, SIM12 Los aluviones de Atacama: context, causas y

efectos: 6 de octubre de 2015. Chile, La Serena, Casino Enjoy Coquimbo. Sociedad Geológica de Chile. pp. 4.

GRIJALBA V., GONZÁLEZ F., VARGAS G. y GONZÁLEZ G. 2015. Granulometría y facies de los sedimentos del aluvión de Chañaral de marzo de 2015. En: XIV CONGRESO GEOLÓGICO Chileno: AT3, SIM12 Los aluviones de Atacama: context, causas y efectos: 6 de octubre de 2015. Chile, La Serena, Casino Enjoy Coquimbo. Sociedad Geológica de Chile. pp. 4.

GRIJALBA GÓMEZ, Víctor. *Geología y análisis histórico-meteorológico del aluvión de marzo de 2015 en Chañaral, Atacama* [en línea]. Santiago, Chile: Universidad de Chile - Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2016 [Fecha consulta: 2 de octubre 2017]. Disponible en < <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/140039>>

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

IVERSON, R. 1997 . The physics of debris flows. *Reviews of geophysics*, vol. 35, no 3, p. 245-296.

JAKOB, MATTHIAS. A size classification for debris flows. *Engineering geology*, 2005, vol. 79, no 3, p. 151-161.

JIONGXIN, Xu. Erosion caused by hyperconcentrated flow on the Loess Plateau of China. *Catena*, 1999, vol. 36, no 1, p. 1-19.

JORDAN T. "et al". 2015. Hydrological and geomorphological consequences of the extreme precipitation event of 24-26 March 2015, Chile. En: XIV CONGRESO GEOLÓGICO Chileno: AT3, SIM12 Los aluviones de Atacama: context, causas y efectos: 6 de octubre de 2015. Chile, La Serena, Casino Enjoy Coquimbo. Sociedad Geológica de Chile. pp. 4.

JULIÁ C., MONTECINOS S. y MALDONADO A. 2008. Características Climáticas de la Región de Atacama. En: SAQUEO F.A., ARANCIO G. y GUTIERREZ J.R. Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación. 3ª ed. La Serena, Chile, Ediciones Universidad de la Serena. pp. 25-42.

KHEGAI, A. Y., N. V. POPOV, P. A. PLEKHANOV, y V. A. KEREMKULOV, 1992..Experiments at the Chemolgan debris-flow testing ground, Kazakhstan, *Landslide News*, Jpn.Landslide Soc., Kyoto, , 6, 27–28.

LARA L. y GODOY E. 1998. Hoja Quebrada Salitrosa, Región de Atacama. Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos N°4. Esc. 1:100.000. Color.

MARSHALL D. 1996. TernPlot: An Excel spreadsheet for plotting ternary diagrams [para descargar]. Computers and Geosciences 22(6):697-699. < http://d32ogoqmya1dw8.cloudfront.net/files/NAGTWorkshops/petrology/ternplot--an_excel_plotting_pr.xls >.

MATTHEWS S., CORNEJO P. y RIQUELME R. 2006. Carta Inca de Oro, Región de Atacama. Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta geológica de Chile Serie Geología Básica N°102. Esc. 1:100.000.

MONROY O., SERAZZI G., HERRERA A. y SERAZZI P. 2000. Chañaral: Una historia en el desierto, 1833-2000. Copiapó, Imprenta de la Universidad de Atacama. 243p.

NALPAS T., DABARD M-P., RUFFET G., VERNON A., MPODOZIS C., LOI A. y HÉRAIL G. 2008. Sedimentation and preservation of the Miocene Atacama Gravels in the Pedernales-Chañaral Area, Northern Chile: Climatic or tectonic control? Tectonophysics 459:161-173.

NARANJO J. OLEA-ENCINA P. Descargas aluviales durante la tormenta del desierto de Atacama en marzo de 2015, Chile. En: XIV CONGRESO GEOLÓGICO Chileno: AT3, SIM12 Los aluviones de Atacama: context, causas y efectos: 6 de octubre de 2015. Chile, La Serena, Casino Enjoy Coquimbo. Sociedad Geológica de Chile. pp. 4.

NEARY, D., Y GARCIA-CHEVESICH, P. 2008: Hydrology and erosion impacts of mining derived coastal sand dunes, Chanaral Bay, Chile. Hydrology and Water Resources in Arizona and the Southwest 47-52.

NICHOLS G. 2009. Sedimentology and Stratigraphy 2^a ed. Oxford, Wiley Blackwell. 432p.

NIEMEYER H. 1980. Hoyas hidrográficas de Chile: Tercera Región. Chile, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. 41p.

PASKOFF, R. y PETIOT, R. 1990. Coastal progradation as a by-product of human activity: an example from Chañaral Bay, Atacama Desert, Chile. Journal of Coastal Research, vol. 6, p. 91-102.

PASSEGA R. 1964. Grain size representation by CM Patterns as a geological tool. Journal of Sedimentary Petrology 34(4):830-847.

PE G.G. y PIPER D.J.W. 1975. Textural recognition of mudflow deposits. Sedimentary Geology 13:303-306.

PETTIJOHN F.J. y POTTER P.E. 1964. Atlas and glossary of primary sedimentary structures. Berlin, Springer-Verlag. 382p.

PETTIJOHN F.J., POTTER P.E. Y SIEVER R. 1973. Sand and Sandstone. Berlin, Springer-Verlag. 631p.

PIERSON, Thomas C. Hyperconcentrated flow—transitional process between water flow and debris flow. En *Debris-flow hazards and related phenomena*. Springer Berlin Heidelberg, 2005. p. 159-202.

PIERSON, T. C., y COSTA, J. E. 1987. A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. *Reviews in Engineering Geology*, 7, 1-12p.

RADIO COOPERATIVA.2015. Las consecuencias de la lluvia en la zona centro norte.[en línea] <http://www.cooperativa.cl/noticias/pais/tiempo/las-consecuencias-de-la-lluvia-en-la-zona-centro-norte/2015-03-24/074058.html> [Consulta: 06 Mayo de 2016]

TAKAHASHI, T. 1991, *Debris Flow*, A. A. Balkema, Brookfield,Vt., 165 pp.

TOMLINSONS A.J., CORNEJO P. y MPODOZIS C. 1999. Hoja Potrerillos, Región de Atacama. Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos N°14. Esc. 1:100.000. Color.

STEVENS, N., MANVILLE, V., & HERON, D. 2002. The sensitivity of a volcanic flow model to digital elevation model accuracy: experiments with digitised map contours and interferometric SAR at Ruapehu and Taranaki volcanoes, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* N°119, 89-105 p.

VAN MAREN, D. S., WINTERWERP, J. C., WU, B. S., & ZHOU, J. J. 2009. Modelling hyperconcentrated flow in the Yellow River. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(4), 596-612.

VARGAS G., ORTLIEB L., RONDANELLI R., ORTEGA C., GRIJALBA V., GONZÁLEZ F. y GONZÁLEZ J. 2015. Impactos de El Niño Godzila en perspectiva histórica y geológica (presentación). En: XIV CONGRESO GEOLÓGICO Chileno: AT3, SIM12 Los aluviones de Atacama: context, causas y efectos: 6 de octubre de 2015. Chile, La Serena, Casino Enjoy Coquimbo. Sociedad Geológica de Chile.

VARGAS G., ORTLIEB L. y RUTLLANT J. 2000. Aluviones históricos en Antofagasta y su relación con eventos El Niño/Oscilación del Sur. *Revista Geológica de Chile* 27(2):155-174.

VARGAS G., RUTLLANT J. y ORTLIEB L. 2006. ENSO tropical-extratropical climate teleconnections and mechanisms for Holocene debris flows along the hyperarid coast of western South America (17°-24°S). *Earth and Planetary Science Letters* 249:467-483.

VISHER G. 1969. Grain size distributions and depositional processes. *Journal of Sedimentary Petrology* 39(3):1074-1106.

WILCOX, A. C., ESCAURIAZA, C., AGREDANO, R., MIGNOT, E., ZUAZO, V., OTÁROLA, S., ... & MAO, L. (2016). An integrated analysis of the March 2015 Atacama floods. *Geophysical Research Letters*, 43(15), 8035-8043.

WINDSURF.2016. Estadísticas del viento y del tiempo Chañaral.[en línea]
<https://www.windfinder.com/windstatistics/chanaral> [Consulta: 16 Julio de 2016]

8 Anexos

8.A Datos Depósito aluvión Chañaral

Tabla 13: Datos de altura de depósito con su respectiva altura sobre el nivel del mar calculado con la interpolación generada con los datos obtenidos del GPS diferencial.

Coordenada este	Coordenada norte	Depósito (m)	m s.n.m.	Depósito m s.n.m.	Comentarios
338382	7085583	2.50	5.44	7.94	
338429	7085683	1.40	7.72	9.12	
337962	7084893	1.25	4.31	5.56	
338034	7084898	1.20	3.71	4.91	
338410	7085519	3.00	5.34	8.34	
338312	7085096	1.70	5.25	6.95	
338344	7085176	2.10	5.21	7.31	
338390	7085326	2.30	5.55	7.85	
337906	7084809	0.60	6.25	6.85	
337889	7084859	0.69	5.10	5.79	
337801	7084832	0.10	6.54	6.64	
338019	7084982	0.62	4.11	4.73	
338221	7084988	1.00	4.79	5.79	
338403	7085359	2.20	5.47	7.67	
338407	7085533	3.00	5.38	8.38	
338475	7085699	0.10	9.44	9.54	
338375	7085664	1.40	6.55	7.95	
338266	7085521	1.80	5.36	7.16	
338407	7085589	2.60	5.45	8.05	
337928	7084898	1.10	4.86	5.96	
338083	7084898	1.16	4.04	5.20	
338157	7085008	1.20	3.74	4.94	
338173	7085064	1.20	3.93	5.13	
338234	7085101	1.00	4.09	5.09	
338263	7085154	1.40	4.44	5.84	
338266	7085261	1.90	4.65	6.55	
338343	7085260	2.20	4.71	6.91	
338438	7085235	2.00	9.42	11.42	
338331	7085235	2.05	4.58	6.63	
338229	7084983	1.00	5.47	6.47	
338228	7085010	1.50	4.59	6.09	

338255	7085342	1.32	5.25	6.57	
338276	7085370	1.15	5.37	6.52	
338355	7085448	1.30	5.22	6.52	
338416	7085496	3.20	5.28	8.48	
338438	7085451	2.50	5.86	8.36	
338458	7085463	2.70	6.41	9.11	
338482	7085530	2.95	5.74	8.69	
338594	7085558	2.50	7.41	9.91	
338888	7085605	1.20	14.54	15.74	
339140	7085681	1.05	14.97	16.02	
339197	7085783	0.65	17.97	18.62	
339208	7085809	0.95	18.63	19.58	
339233	7085837	1.60	19.01	20.61	
338226	7085597	1.05	5.66	6.71	
338312	7085096	0.00	5.31	5.31	límite de inundación
338232	7084975	0.00	6.39	6.39	límite de inundación
338687	7085549	0.00	11.48	11.48	límite de inundación
339621	7085973	0.00	24.33	24.33	límite de inundación
338417	7085231	0.00	7.52	7.52	límite de inundación
338236	7084969	0.00	7.49	7.49	límite de inundación
338594	7085474	0.00	10.76	10.76	límite de inundación
338497	7085439	0.00	9.59	9.59	límite de inundación
338795	7085562	0.00	13.79	13.79	límite de inundación
339203	7085846	0.00	19.97	19.97	límite de inundación
338742	7085735	0.00	13.16	13.16	límite de inundación
338476	7085694	0.00	9.04	9.04	límite de inundación
338742	7085735	0.00	13.16	13.16	límite de inundación
338476	7085694	0.00	9.04	9.04	límite de inundación

8.B Datos Inundación aluvi3n Chañaral

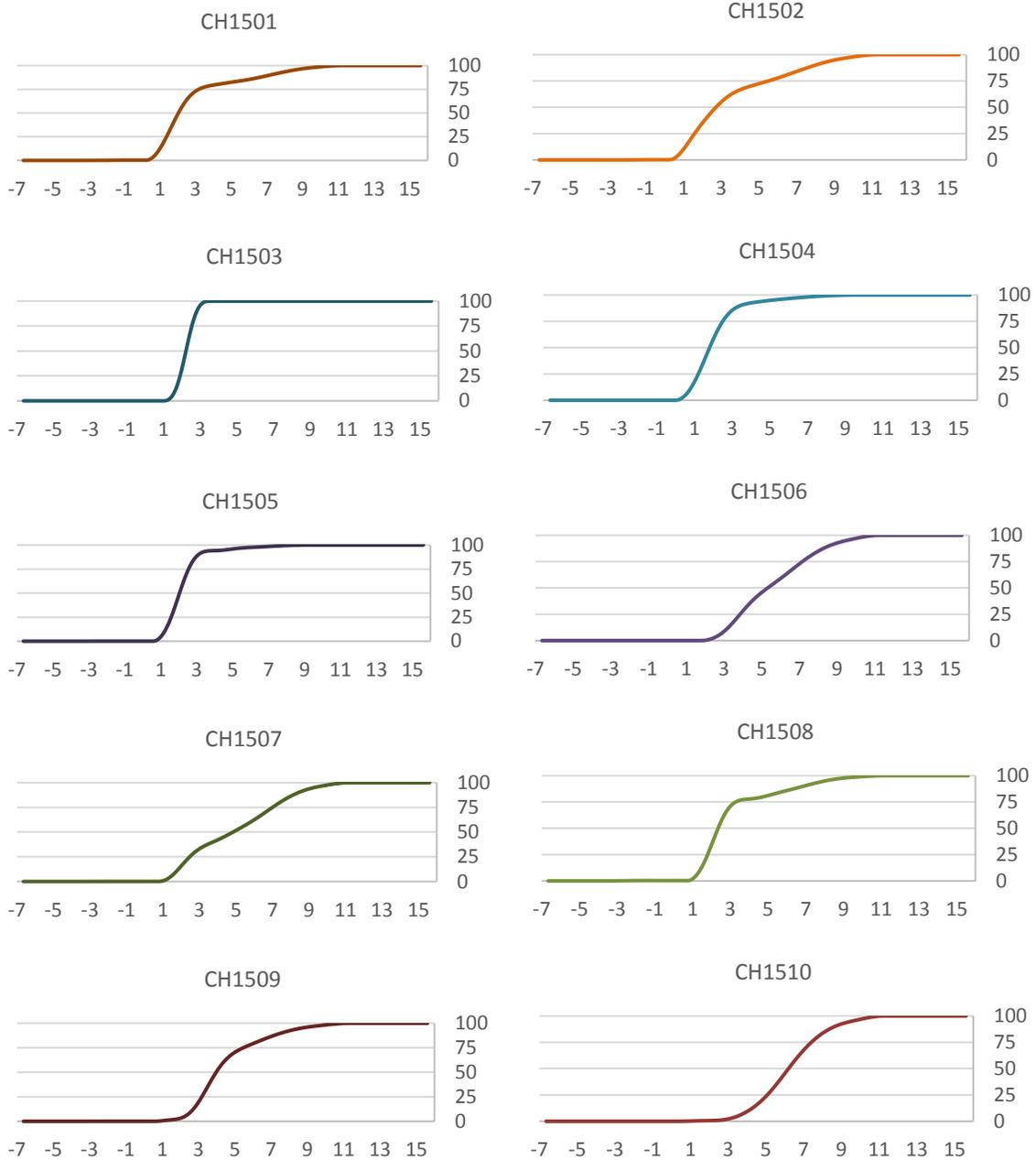
Tabla 14: Datos de altura de Inundaci3n con su respectiva altura sobre el nivel del mar calculado con la interpolaci3n con los datos de GPS diferencial.

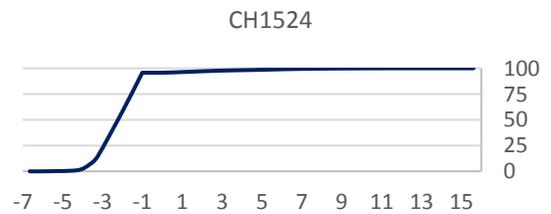
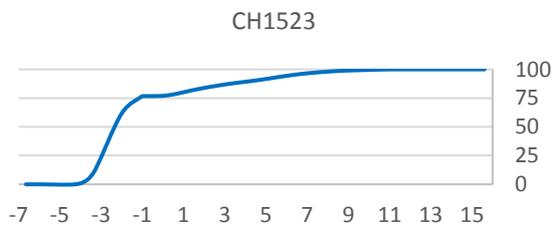
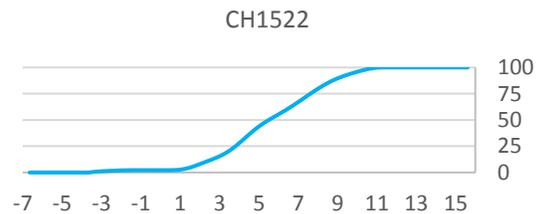
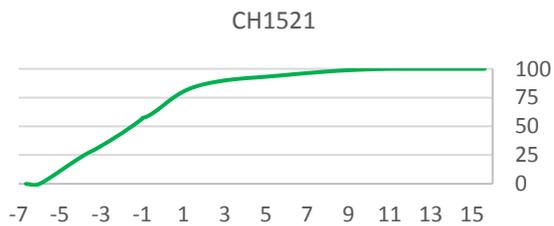
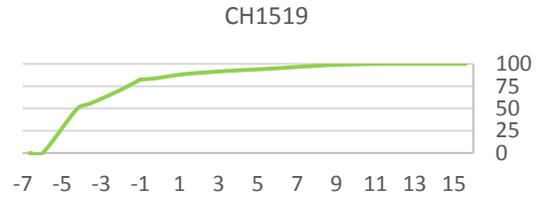
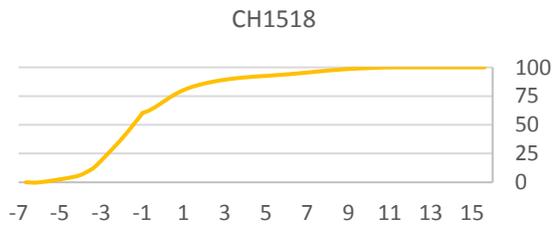
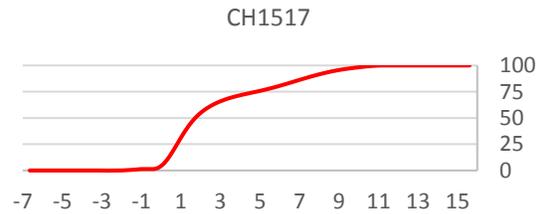
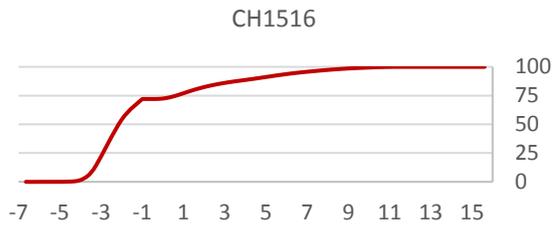
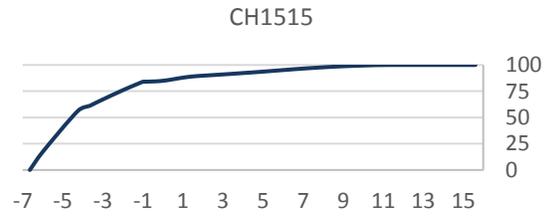
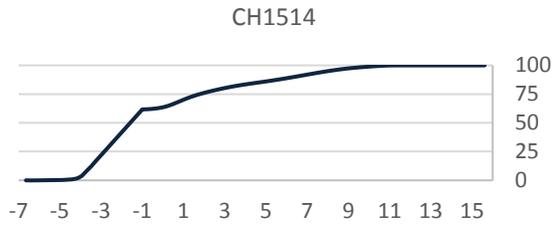
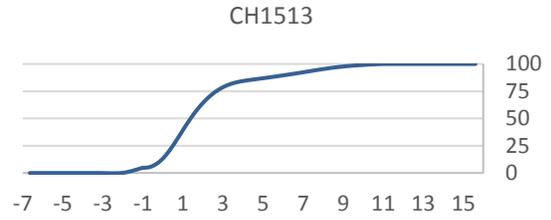
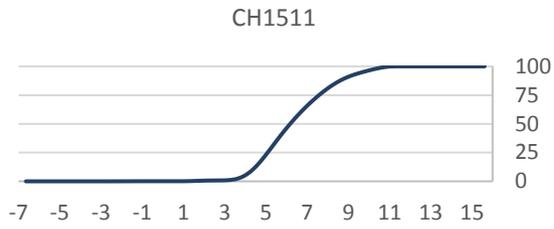
Coordenada este	Coordenada norte	Inundaci3n (m)	m s.n.m.	Inundaci3n m s.n.m.	Comentarios
338382	7085583	3.25	5.44	8.69	
338429	7085683	1.95	7.72	9.67	
338034	7084898	2.70	3.71	6.41	
338312	7085096	2.83	5.25	8.08	
338344	7085176	3.00	5.21	8.21	
338390	7085326	3.20	5.55	8.75	
337906	7084809	1.10	6.25	7.35	
337889	7084859	1.30	5.1	6.4	
337801	7084832	0.20	6.54	6.74	
337879	7084872	1.20	5.38	6.58	
338221	7084988	2.00	4.79	6.79	
338403	7085359	3.10	5.47	8.57	
338475	7085699	0.20	9.44	9.64	
338375	7085664	3.40	6.55	9.95	
338266	7085521	2.30	5.36	7.66	
338407	7085589	3.70	5.45	9.15	
338083	7084898	2.70	4.04	6.74	
338157	7085008	2.43	3.74	6.17	
338173	7085064	2.42	3.93	6.35	
338234	7085101	2.00	4.09	6.09	
338263	7085154	2.30	4.44	6.74	
338266	7085261	2.16	4.65	6.81	
338343	7085260	2.63	4.71	7.34	
338438	7085235	2.70	9.42	12.12	
338331	7085235	3.50	4.58	8.08	
338229	7084983	2.00	5.47	7.47	
338228	7085010	2.10	4.59	6.69	
338276	7085370	1.55	5.37	6.92	
338355	7085448	2.30	5.22	7.52	
338416	7085496	4.20	5.28	9.48	
338438	7085451	3.50	5.86	9.36	
338458	7085463	3.40	6.41	9.81	
338482	7085530	3.35	5.74	9.09	
338594	7085558	3.70	7.41	11.11	

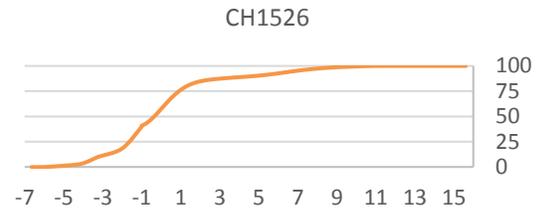
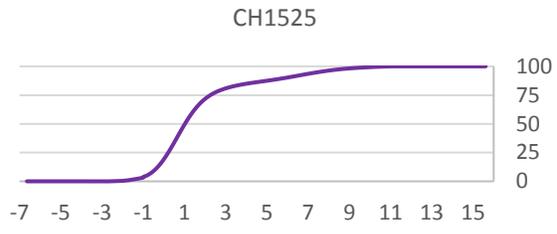
338888	7085605	2.40	14.54	16.94	
339140	7085681	2.10	14.97	17.07	
339197	7085783	3.00	17.97	20.97	
339208	7085809	2.00	18.63	20.63	
339233	7085837	2.20	19.01	21.21	
338226	7085597	2.10	5.66	7.76	
338312	7085096	0.00	5.31	5.31	límite de inundación
338232	7084975	0.00	6.39	6.39	límite de inundación
338687	7085549	0.00	11.48	11.48	límite de inundación
339621	7085973	0.00	24.33	24.33	límite de inundación
338417	7085231	0.00	7.52	7.52	límite de inundación
338236	7084969	0.00	7.49	7.49	límite de inundación
338594	7085474	0.00	10.76	10.76	límite de inundación
338497	7085439	0.00	9.59	9.59	límite de inundación
338795	7085562	0.00	13.79	13.79	límite de inundación
339203	7085846	0.00	19.97	19.97	límite de inundación
338742	7085735	0.00	13.16	13.16	límite de inundación
338476	7085694	0.00	9.04	9.04	límite de inundación

8.C Curvas Granulométricas Acumulativas

Se presentan las curvas granulométricas acumulativas de todas las muestras por separado, Eje vertical corresponde a porcentaje en peso (acumulativo) y horizontal a tamaño de grano en escala Phi.







8.D Datos de muestras

Tabla 15: Datos pertinentes a las muestras tomadas en terreno. Las coordenadas se encuentran en UTM y el peso está medido en gramos. En las facies, cada letra corresponde a una de las facies definidas en Resultados, donde (i) significa parte inferior del depósito y (s) parte superior. En la composición, los valores de la izquierda corresponden a los sedimentos mayores a 2 mm y los de la derecha, a los menores a 2 mm.

Muestra	Ubicación		Peso	Facies	Granulometría					Composición					
	E	N			Promedio	Mediana	Selección	Asimetría	Curtosis	Cuarzo	Feldespatos	Líticos			Met.
											Int.	Ext.	Sed.		
CH1501	337879	7084872	413,2	E (i)	2,906	2,042	2,283	0,618	1,753	30/10	25/15	15/0	0/75	30/0	0/0
CH1502	337879	7084872	435,4	E (s)	3,654	2,724	2,696	0,504	0,871	-	-	-	-	-	-
CH1514	338403	7085359	1106,9	B (i)	-0,224	-1,854	3,688	0,873	1,061	10/46	15/8	0/0	70/45	0/1	5/0
CH1515	338403	7085359	2333,4	B (s)	-3,859	-4,527	3,130	0,543	1,429	-	-	-	-	-	-
CH1516	338393	7085332	1362,3	D (i)	-0,976	-2,126	2,946	0,659	1,185	35/40	20/15	5/5	10/20	30/15	5/5
CH1517	338393	7085332	1201,2	D (s)	2,952	1,732	2,849	0,608	0,898	35/25	25/30	15/5	10/25	10/10	5/5
CH1518	338407	7085533	1517,4	B (i)	-1,003	-1,447	2,845	0,383	1,435	20	20	15	10	30	10
CH1519	338407	7085533	1599,4	B (s)	-3,246	-4,149	3,082	0,614	1,387	20/19	30/25	15/0	5/45	25/1	5/10
CH1521	338266	7085521	1867,3	C	-1,545	-1,520	3,293	0,149	1,111	10/25	20/25	0/0	64/40	1/1	5/9
CH1522	342357	7085979	965,7	Ext.	5,651	5,505	2,587	0,064	0,892	50	10	20	5	10	5
CH1523	338157	7085008	3068,2	B.1	-1,149	-2,302	2,800	0,698	2,198	10/15	15/20	0/0	65/50	5/10	5/5
CH1524	338173	7085064	2250,3	B (s)	-2,245	-2,228	0,896	-0,083	0,826	20	30	15	10	20	5
CH1525	338173	7085064	2632,4	B (i)	1,535	1,022	2,224	0,477	1,664	30	20	20	10	15	5
CH1526	338263	7085154	3442,2	D (s)	-0,287	-0,359	2,672	0,199	1,689	35	20	5	15	20	5
CH1527	338263	7085154	2664,6	D (i)	-2,897	-3,561	3,042	0,485	1,414	20/35	25/15	25/5	5/15	20/20	5/10
CH1528	338331	7085235	2596,1	B (i)	-0,192	-1,289	3,262	0,542	1,194	-	-	-	-	-	-
CH1529	338331	7085235	3331,3	B (s)	-1,581	-2,914	3,613	0,570	1,087	20	25	15	10	25	5
CH1530	338255	7085342	3258	B (s)	0,555	-0,197	2,963	0,416	1,167	30	25	15	5	20	5
CH1531	338255	7085342	2628,8	B (i)	-0,423	-1,753	3,143	0,640	0,986	15	25	20	10	25	5
CH1532	339233	7085846	2477,2	A	-0,426	-1,502	3,035	0,611	1,086	20	30	25	10	10	5
CH1533	338800	7085682	2250,5	A	2,203	1,716	3,310	0,259	1,120	25	25	15	10	20	5
CH1534	338105	7086136	2501,1	C	-1,290	-2,223	3,444	0,428	1,023	15/15	20/40	0/0	50/25	0/0	15/20

8.E Regresiones lineales e integración Curva Caudal vs. tiempo

Tabla 16: Ecuaciones de las regresiones lineales de los tramos de la curva caudal tiempo representada en la Figura 45. La Tabla presenta sus respectivas integraciones que evaluada en sus límites representan el Volumen del flujo aluvial.

Tramo	Regresión lineal	Integrales	Volumen (m^3)
a-b	$Q(m^3/s) = 0.0185t(s) + 69$	$V(m^3) = 0,00925t(s)^2 + 69t(s)$	26.974.080,000
b-c	$Q(m^3/s) = -0,607t(s) + 31625$	$V(m^3) = 31625 t(s) - 0,3038 t(s)^2$	476.335,411
c-d	$Q(m^3/s) = 6,5972t(s) - 335650$	$V(m^3) = 3,2986 t(s)^2 - 335650 t(s)$	161.836,646
d-e	$Q(m^3/s) = -0,5556t(s) + 30000$	$V(m^3) = 30000 t(s) - 0.2778 t(s)^2$	2.017.428,941
e-f	$Q(m^3/s) = 19,815t(s) - 10^6$	$V(m^3) = 9,9075t(s)^2 - 10^6 t(s)$	5.519.500,920
f-g	$Q(m^3/s) = -0,0467t(s) + 5178,2$	$V(m^3) = 5178,2 t(s) - 0.02335 t(s)^2$	77.960.533,700
		Volumen Total(m^3)	113.109.715,600
		Volumen Total(km^3)	0,113

8.D Resumen Congreso Geológico Chileno 2015

Mapeo de la inundación y depósitos del aluvión de Chañaral de marzo de 2015

Fabiola González*, Víctor Grijalba, Gabriel Vargas y José González

Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

*email: fabi.gd@gmail.com

Resumen. Se mapeó la inundación y el espesor de los depósitos del aluvión de marzo 2015 en Chañaral, a partir de observaciones de terreno e imágenes satelitales. Este aluvión generó cambios drásticos en la geomorfología de la Bahía, variando la línea de costa en 650 metros. Se observó que en el sector de la desembocadura del río Salado se produjeron los mayores niveles de inundación, desviándose el flujo principalmente hacia el sur. Se calcula la tasa con la que las alturas de inundación y depósitos disminuyen a medida que el flujo avanza, con valores para ambos de 0,028 metros por metro de avance. Hay una gran participación de la disposición de las calles y las construcciones de la ciudad en lo observado en este flujo.

Palabras Claves: aluvión, Chañaral, inundación, espesor de depósitos, Holoceno, Chile.

1 Introducción

El 24 y 25 de marzo de 2015 se registró un gran temporal en el norte de Chile, debido a un núcleo frío en altura.

Estas altas precipitaciones en un periodo corto de tiempo, generaron desbordes en los ríos Copiapó y El Salado. Para el caso de este estudio se analizó el flujo correspondiente al río El Salado que afectó principalmente las localidades de Diego de Almagro, El Salado y Chañaral, entre otras. Dicho evento tuvo como consecuencia la muerte y desaparición de varias personas (por lo menos 21 hasta abril de 2015, sólo en Chañaral, según el Servicio Médico Legal y la Policía de Investigaciones de Chile), grandes pérdidas económicas y un grave problema social para estas localidades.

Se presenta la metodología y los resultados del mapeo de los niveles de inundación y espesor de los depósitos que dejó el aluvión en la ciudad de Chañaral, se analiza el comportamiento de este flujo a partir de gráficos comparativos, y se discute preliminarmente la relación espacial de las alturas de la inundación con los eventos cruciales del aluvión, como su llegada a la ciudad por el cauce del río, su desvío al sur de la ciudad y el posible factor de la carretera en este desvío.

2 Metodología

2.1 Niveles de Inundación y depósito

Para el aluvión de marzo del 2015 el trabajo consistió principalmente en un levantamiento sistemático en búsqueda de marcas de inundación que dejó el paso del aluvión en las construcciones de la ciudad de Chañaral. Este levantamiento fue realizado en dos campañas de terreno los días 10 de abril al 15 de abril y del 28 de abril al 3 de mayo del 2015 respectivamente. Igualmente se midieron las alturas de los depósitos aluviales, todo esto usando la calle como nivel base con una precisión de 10 cm. La distribución de la información obtenida fue condicionada por la accesibilidad a los afloramientos y marcas. Se realizaron observaciones en alrededor de 45 puntos/localidades.

2.2 Mapeo

Se mapeó la inundación basándose en las imágenes satelitales proporcionadas por *Google Earth*, apoyándose con 12 datos obtenidos en terreno que marcan el límite exacto de la inundación en la ciudad de Chañaral. Usando el registro histórico de *Google Earth* se pudo trazar la línea de costa pre-aluvión.

2.3 Gráficos

Se realizaron perfiles O-E a lo largo de la ciudad usando la información de inundación y espesor de los depósitos, partiendo desde la parte más sur de la inundación hasta llegar al río El Salado. Por otro lado también se realizó un gráfico que muestra la altura de la inundación y de los depósitos desde el eje del río Salado hacia el sur, es decir, la parte baja de la ciudad.

3 Reseña Histórica

La Bahía de Chañaral de Las Ánimas se ha visto expuesta a distintos desastres naturales y antropológicos a lo largo de los años, los cuales han cambiado su morfología.

Los registros históricos hablan de un maremoto en 1877 que inundó las calles centrales del puerto. Luego en 1922 otro maremoto de mayor envergadura azotó la ciudad, abarcando 60.000 m² de terreno el cual fue destruido.

En febrero de 1972 la ciudad fue castigada por un aluvión causando anegamientos en las calles principales y destruyó a su paso, al igual que el de este año, la línea férrea y la carretera que une los pueblos de Llanta, Diego de Almagro y El Salado con Chañaral.

Por otro lado, cambios geomorfológicos de origen antrópico se produjeron cuando *Andes Cooper Mining Company* y luego Codelco-Chile división Salvador, vaciaron directamente los relaves de Potrerillos en el lecho del río El Salado, para desembocar finalmente en el mar. Este proceso duró desde 1938 a 1975, momento en que se decidió trasladar el vaciado de relaves a una bahía ubicada 9 km al norte de Chañaral. En 1990 por mandato de la Corte Suprema de Justicia, se habilitó un tranque de relave, terminando así el vaciado en el lecho del río.

Los años de aporte de relaves en el río produjeron un embancamiento de la playa, moviendo la línea de costa hacia el oesteeste; esta geomorfología volvió a cambiar con el pasado aluvión de marzo 2015.

4 Resultados

Las mediciones realizadas se representan en las Figura 1 y 2, donde se puede visualizar la distribución espacial de los niveles de inundación y altura de depósitos a lo largo de la ciudad. En esta imagen se ubican los 6 perfiles O-E, que se grafican en la Figura 3, que se realizaron en el área de inundación, partiendo de la zona más alejada del aluvión hacia el río Salado..

A partir de la Figura 1, en particular, se infiere el comportamiento de la inundación al igual que el de los depósitos en el desborde desde el flujo principal, por el río Salado, hacia el sur, la parte baja de la ciudad.

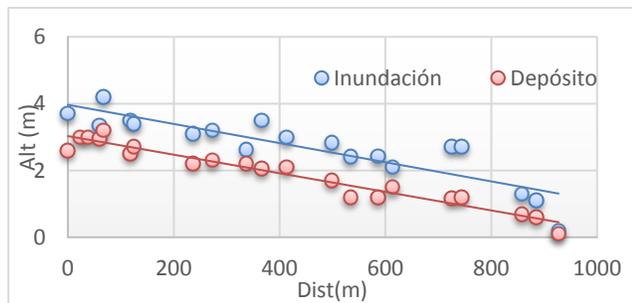


Figura 1: Gráfico de altura versus distancia, que muestra el cambio de los niveles de inundación y alturas de depósitos desde el río Salado hacia el sur. Se representan las regresiones lineales correspondientes a cada uno.

5 Análisis y discusión

Al observar las Figuras 1 y 2 se observa que en el sector de la desembocadura del río es donde ocurrieron los mayores

niveles de inundación, disminuyendo hacia el norte y también, en un área mayor, hacia el sur. Se puede inferir, hacia el sur del río, que las calles con dirección N-S actuaron como canales, aumentando la inundación en la confluencia de éstas con las calles E-O. Igualmente se puede observar, en la Figura 2, el cambio en la línea de costa, la cual retrocedió hasta 650 metros en algunas áreas y se corrió hacia el oesteeste en la desembocadura del río.

En la Figura 1 se observa un comportamiento lineal de la altura de inundación y de los depósitos mientras nos alejamos desde el eje del río hacia el sur, con una tasa de disminución estimada, a partir de la regresión lineal (Figura 1), de 0,028 m/m. Las pequeñas desviaciones respecto de esta tendencia son esperables dadas la irregularidades en el flujo, en la topografía y por la confluencia de calles..

En los gráficos de la Figura 3 se observa que en la parte central (perfiles C-C', D-D', E-E') la inundación y los depósitos fueron en gran parte homogénea, no existiendo mucha variación a lo largo del perfil. En el Perfil F-F' muestra como la acumulación de los depósitos, al igual que la altura de la inundación aumenta al llegar a la ciudad, lo que puede ser explicado por el freno que pudieron generar las construcciones de la ciudad.

Finalmente, queda pendiente en este trabajo un análisis más exhaustivo, incluyendo información de GPS diferencial para entender mejor el comportamiento del flujo del aluvión en función de su reología, caudal, velocidad, así como de la topografía de detalle en la ciudad de Chañaral, a partir de la modelación del fenómeno.

6 Agradecimientos

En primer lugar agradecemos la hospitalidad y apoyo logístico de Cristian Cerda, ciudadano de Chañaral, quien contribuyó generosamente en todo momento para la realización de esta investigación. Agradecemos también al resto del equipo que conforma este estudio en sus distintos aspectos: Linda Daniele, Nicole Salas, Carolina Valderas, junto al apoyo logístico de Sergio "Warrior" Villagrán. Además agradecemos a toda la gente de Chañaral y Diego de Almagro, sobre todo a doña Edita Rojas por su gran ayuda durante el trabajo en terreno.

7 Referencias

Monroy, O.; Serazzi, G.; Herrera, A.; Serazzi, P.; 2000. Chañaral: Una historia en el desierto, 1833-2000. Imprenta de la Universidad de Atacama: 243 p., Copiapó.

Policía de Investigaciones, 2015. In press. Listado de personas desaparecidas en la zona norte (hasta el 8 de abril).

Servicio Médico Legal, 2015. In press. Listado total de fallecidos en la zona norte (hasta el 7 de abril).

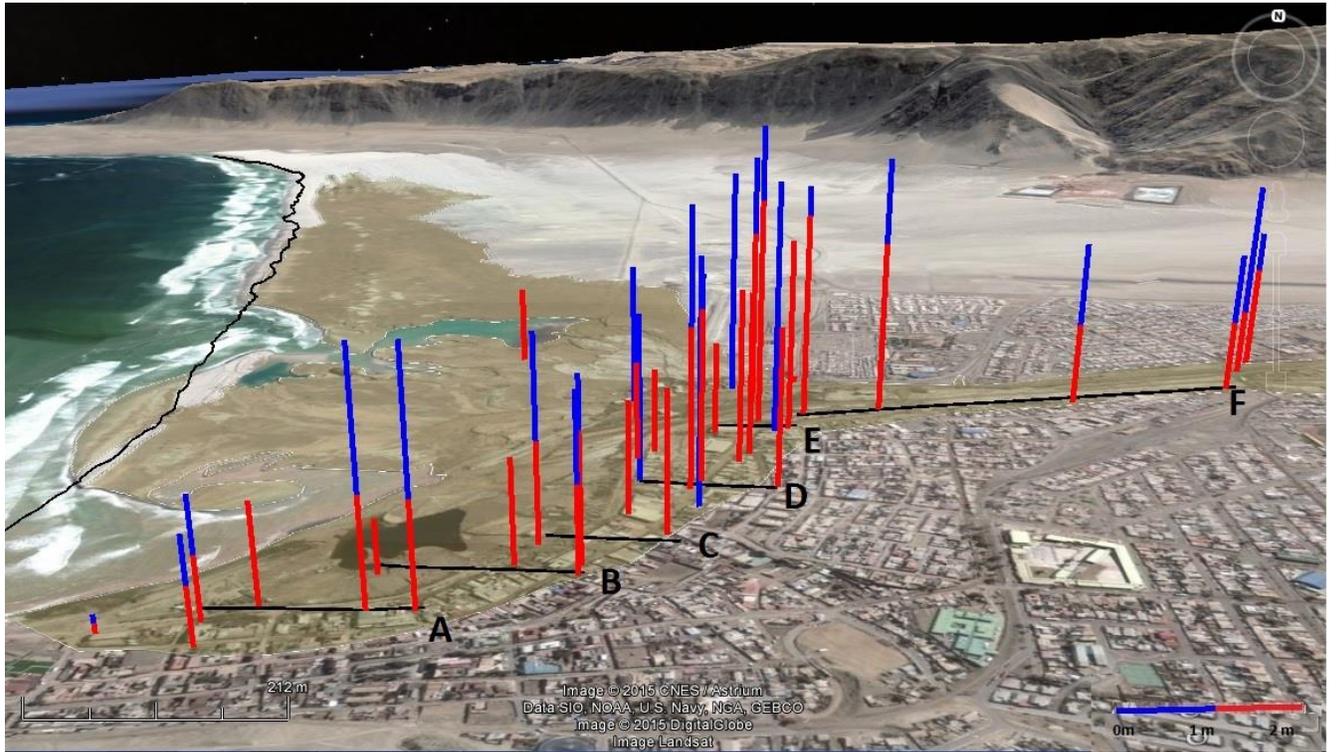


Figura 2. Imagen satelital de Google Earth modificada mostrando en azul los niveles de inundación y en rojo los niveles de depósito. En amarillo se observa el mapeo total de la inundación en la ciudad de Chañaral. En el lado Oesteeste, en negro, se demarca la línea de costa pre-aluvión. Desde el sur al norte se observa la ubicación de los distintos perfiles (A, B, C, D, E y F).

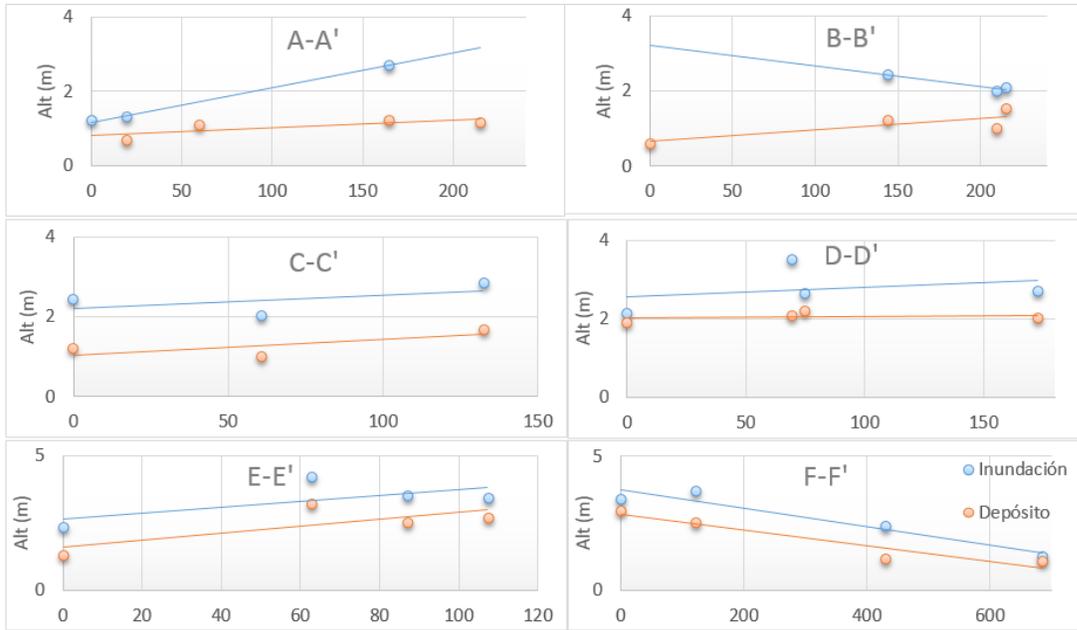


Figura 3. Perfiles W-E de la inundación y deposición partiendo desde el sur, es decir, la parte terminal de la inundación (perfil A-A'), avanzando hacia la parte central del río (perfil F-F'). Los perfiles avanzan de este a oesteeste.

8.E Poster Congreso Geológico Chileno 2015



Mapeo de la inundación y depósitos del aluvión de Chañaral de marzo de 2015

Fabiola González*, Víctor Grijalba, Gabriel Vargas y José González
 Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile
 *email: fabi.gd@gmail.com

Introducción

El 24 y 25 de marzo de 2015 se registró un gran temporal en el norte de Chile, debido a un núcleo frío en altura. Estas altas precipitaciones en un periodo corto de tiempo, generaron desbordes en los ríos Copiapó y El Salado. Dicho evento tuvo como consecuencia la muerte y desaparición de varias personas, al igual que grandes pérdidas económicas y un grave problema social para estas localidades. Para el caso de este estudio se analizó el flujo correspondiente al río El Salado que afectó principalmente las localidades de Diego de Almagro, El Salado y Chañaral. La ciudad de Chañaral ha sido golpeada por aluviones, tsunamis y desastres antrópicos debido a los 37 años en que vaciaron directamente los relaves de Potrerillos en el lecho del río El Salado, para desembocar finalmente en el mar, cambiando así la línea de costa. El objetivo es estudiar el aluvión para así lograr modelar su comportamiento y generar mapas de riesgos 2D.

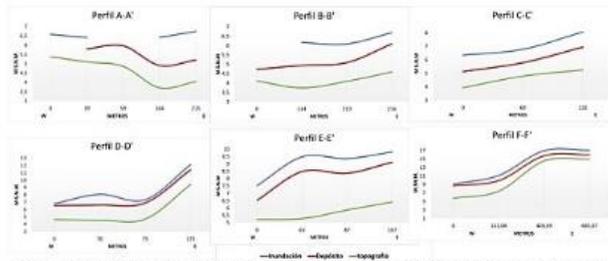


Figura 2: Perfiles W-E de la inundación, depósitos y topografía partiendo desde el sur, en la parte terminal de la inundación (perfil A-A') avanzando hacia la parte central del río (perfil F-F'). La ubicación de los perfiles se encuentra en la figura 1. Los datos se midieron con respecto al nivel del mar utilizando la interpolación obtenida en la figura 5.

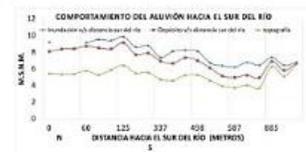


Figura 3: Gráfico de altura versus distancia, que muestra el cambio de los niveles de inundación y alturas de depósitos desde el río Salado hacia el sur. La ubicación se representa en el perfil G de la figura 1. Los datos se midieron con respecto al nivel del mar y utilizando la interpolación obtenida en la figura 6.

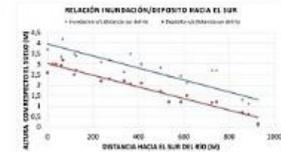


Figura 4: Gráfico de altura versus distancia, que muestra el cambio de los niveles de inundación y alturas de depósitos desde el río Salado hacia el sur. Se representan las regresiones lineales correspondientes a cada uno, con una tasa de disminución estimada para ambas de 0,028 m/m y un $R^2 = 0,7693$.

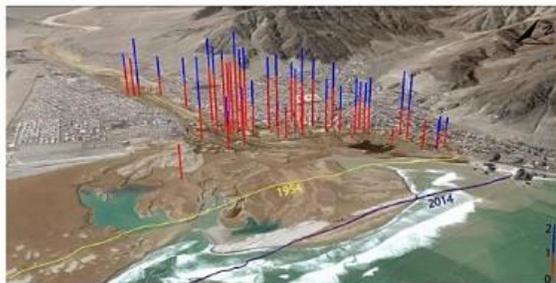


Figura 5: Imagen satelital de Google Earth modificada mostrando en barras los 60 datos obtenidos en terreno. La parte roja representa los niveles de depósito, mientras que la parte azul la inundación. En tonos anaranjados se observa el área de inundación del aluvión. En el lado Oeste, en amarillo se demarca la línea de costa de 1954, en la fase inicial del desecho de relaves. En morado se observa la línea de costa pre-aluvión. La escala vertical está exagerada para su interpretación.

Conclusiones

Con los datos obtenidos en el Perfil F-F', al igual que en la figura 3 y 4, se observa como la acumulación de los depósitos y la altura de inundación, aumenta al llegar a la parte central de la ciudad de Chañaral; por lo tanto, se puede inferir que la morfología de la ciudad actúa como un factor importante en el comportamiento del aluvión. Hacia el lado sur del río las calles y construcciones con dirección N-S actuaron como canales, aumentando la inundación en la confluencia de éstas con las calles de dirección E-O. La impermeabilidad del asfalto al parecer también juega un rol, ya que se observa una mayor altitud de inundación en la ciudad, en comparación con el río aguas arriba, donde las alturas de inundación son menores debido a la permeabilidad del lecho del cauce como se observa en la figura 4. Otro factor que parece ser importante es el efecto dique que generó la carretera de la ruta norte S, provocando una extensión de la inundación en la dirección N-S, desviando un porcentaje del flujo de la desembocadura principal. Se puede observar en la figura 4 el retroceso de la línea de costa, la cual retrocedió hasta 650 metros en algunas áreas y en otras avanzó hacia el oeste a la altura de la desembocadura del río. Debido a que gran parte del aluvión se depositó en el mar, es importante el trabajo de estimación de volumen de inundación, ya que acompañado con datos de tiempo y caudal obtenido por testigos visuales, se podría estimar el volumen total de este evento. Este tipo de desastres naturales nos recuerdan que como país es necesario mejorar las políticas de planificación territorial.

Referencias

Monroy, O.; Serazzi, G.; Herrera, A.; Serazzi, P.: 2000. Chañaral: Una historia en el desierto. 1833-2000. Imprenta de la Universidad de Atacama: 243 p., Copiapo.
 Díaz, M.; 2002. Geoestadística Aplicada. Instituto de Geofísica, UNAM, Instituto de Geofísica y Astronomía, CITMA. 131 p., DF, México.



Figura 1: Chañaral en una imagen satelital modificada de Google Earth. El polígono anaranjado representa la zona de inundación del aluvión. Las líneas N-S representan la ubicación de los perfiles observados en la figura 2. El perfil G representa la ubicación de los gráficos de la figura 3 y 4.

Resultados

Al observar las figuras 2 y 4, se observa que en el sector de la desembocadura del río es donde ocurrieron los mayores niveles de inundación, disminuyendo hacia el norte y también, en una mayor área, hacia el sur. El perfil F-F' muestra como la potencia de los depósitos, al igual que la altura de inundación, aumenta con respecto a la topografía al llegar a la ciudad. En la figura 3 se observa el comportamiento de la inundación y de los depósitos mientras nos alejamos desde el río hacia el sur, con una tasa de disminución, estimada con una regresión lineal, de 0,028 m/m. Las pequeñas desviaciones respecto a la tendencia son esperables dadas las irregularidades en el flujo, topografía y la confluencia de calles. En la parte central (perfiles B-B', C-C', D-D', E-E') la inundación y los depósitos fueron en gran parte homogénea.

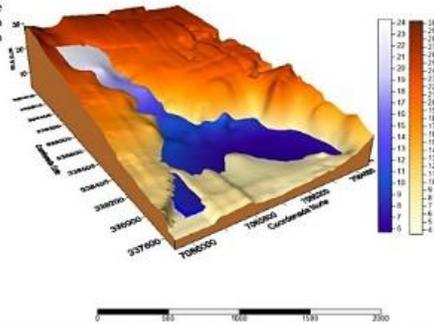


Figura 6: Imagen de los avances para estimar el volumen del depósito e inundación del aluvión. En tonalidades anaranjadas se representa la modelación de la topografía, usando 700 datos tomados en abril del 2015 con GPS diferencial. En tonalidades azules se representa la inundación, interpolada con 60 datos obtenidos en terreno. Para la modelación se utilizó el software SURFER, mediante la interpolación de tipo kriging, que da la mejor estimación lineal insesgada de los valores de los puntos, esto es, elegir el promedio ponderado de los valores de las muestras la cual tenga la mínima varianza.